



Universidad  
Carlos III de Madrid



2012

**LIBRE ACCESO**  
**(Sin Confidencialidad)**

# **« Utilización de un modelo híbrido con el objetivo de acelerar la simulación numérica de una turbina eólica »**

**Proyecto : PA-F12093**



Alumno : Daniel CARCIENTE DE BLAS

Tutores en Universidad Arts et Métiers-

ParisTech: M. Fawaz MASSOUH

M. Ivan DOBREV

École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers-

Paris, FRANCE

26/06/2012



Universidad  
Carlos III de Madrid





Universidad  
Carlos III de Madrid



**Año:** 2012

**Nº de PFC en Universidad de Destino :** PA-F12093

**Centro de realización del PFC :** Arts et Métiers Paris-Tech Paris

**PFC realizado en el marco de:** Erasmus Doble Diploma

**AUTOR:** Daniel CARCIENTE DE BLAS

**TITULO:** « Utilización de un modelo híbrido con el objetivo de acelerar la simulación numérica de una turbina eólica »

**Tutores en Universidad de Destino:** M. Fawaz MASSOUH, M. Ivan DOBREV

**Tutores en Universidad de Origen y Coordinador Académico:** Elisa Maria Ruiz Navas

**Fecha de Lectura:** 26 Junio 2012

**Calificación Obtenida:** Calificación obtenida en el centro de realización del PFC, 16/20. La calificación obtenida en la Universidad Carlos III de Madrid queda sujeta a la convalidación de notas interna.

**RESUMEN :** Proyecto enmarcado en una actividad de investigación en el seno del laboratorio de Mecánica de Fluidos de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers-ParisTech que consiste en el desarrollo de un modelo híbrido equivalente a la geometría real de un rotor eólico, sin estar obligados a representar la geometría real de la pala de la turbina eólica ni modelizar la capa límite alrededor de ella. La utilización de este modelo híbrido en un cálculo de simulación numérica mejorará el tiempo de cálculo significativamente. De esta manera, se logrará la posibilidad de simular diversas turbinas eólicas simultáneamente y con ello, se podrá optimizar con mayor facilidad la concepción y gestión de los parques eólicos.

**PALABRAS CLAVE :** Estela eólica/ Límite de Betz / Modelo híbrido / Simulación numérica / Línea activa.



### **RESUMEN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA:**

#### ***UTILIZACIÓN DE UN MODELO HÍBRIDO CON EL OBJETIVO DE ACELERAR LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA TURBINA EÓLICA***

- Contexto del Proyecto Fin de Carrera:

La realización de dicho proyecto de fin de carrera se engloba dentro de la estancia académica realizada por el presente alumno, Daniel Carciente de Blas, en el marco del Programa Doble Diploma Erasmus de 18 meses de duración, realizada en la École Nationale Supérieure des Arts et Métiers-ParisTech (ENSAM), bajo el acuerdo establecido entre la universidad de destino y la Universidad Carlos III de Madrid.

El proyecto se desarrolló entre Enero 2012 y Junio 2012 en el marco de una actividad de investigación llevada a cabo en el laboratorio de Mecánica de Fluidos y Aerodinámica de la ENSAM, por parte de un investigador que realizaba su tesis bajo el título: "*Desarrollo de un modelo híbrido de superficie activa para mejorar la representación de cargas aerodinámicas sobre una aspa de la turbina eólica*".

- Descripción del Proyecto Fin de Carrera:

El objetivo principal del proyecto es el desarrollo de un modelo híbrido equivalente al rotor eólico que pueda ser implantado en un cálculo de simulación numérica, sin estar obligados a representar la geometría real de las hélices o aspas de la turbina eólica ni realizar la modelización de la capa límite. Bajo estas simplificaciones, se conseguiría una reducción significativa del tiempo de cálculo que podría permitir la simulación simultánea de varias turbinas eólicas. Con todo ello, se podría considerar la implantación de este método para la implantación en un parque eólico.



- Desarrollo del Proyecto Fin de Carrera:

La primera etapa del proyecto consistió principalmente en una amplia búsqueda bibliográfica de todos los aspectos de la gestión de los parques eólicos y también del estudio de los trabajos anteriormente realizados en el seno del laboratorio.

Durante la segunda etapa, tuve la oportunidad de recibir un curso introductorio de los dos programas (software) que utilizaría a lo largo de la realización del proyecto. Para la modelización en mecánica de fluidos se utilizó FLUENT y con el objetivo de realizar el mallado de las superficies de control, se utilizó GAMBIT. Este curso introductorio y la posterior utilización de estos programas durante la realización del proyecto, me permitió adquirir múltiples conocimientos de dichos programas utilizados para la simulación en mecánica de fluidos.

Mediante la utilización de estos programas, pude realizar la comparación entre resultados obtenidos mediante simulación numérica y mediante casos reales experimentados.

La tercera etapa consistió en la exportación de los valores de la presión estática en el extradós y en el intradós de los álabes de la turbina eólica a partir de la simulación en FLUENT para compararlos con valores experimentales obtenidos en el túnel de viento existente en el propio laboratorio.

La última etapa realizada fue el desarrollo de un código en el lenguaje de programación C++ que permitiese la determinación de puntos próximos al modelo híbrido de línea activa, que representa la geometría real de las palas de la turbina eólica, para utilizarlos en simulaciones 3D y con ello, mejorar el tiempo de cálculo, que hasta la actualidad, es bastante elevado. Esta exportación de datos, servirá como base para experimentaciones y trabajos futuros en el seno del laboratorio en el cual se realizó el proyecto.

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA



Actualmente, la energía eólica se está desarrollando de una forma bastante importante y se está convirtiendo en un medio industrial de producción de electricidad, a pesar de las limitaciones aún existentes que la impiden ser competitiva con otros tipos de energía actualmente más potentes. Se trata de una energía renovable utilizada a nivel mundial con el desafío de reducir en lo posible las emisiones de efecto invernadero.

La energía eólica ha sufrido un fuerte desarrollo desde la década de los 90 y se ha mostrado como una fuente de energía con posibilidades de competir con otros tipos de energía convencionales, como el carbón o el gas natural, para la generación de electricidad.

El principio de funcionamiento de los aerogeneradores es relativamente sencillo: la energía cinética del aire es convertido en energía mecánica de rotación gracias a una turbina eólica formada por unas hélices que efectúan un movimiento rotativo debido a la aplicación de fundamentos aerodinámicos. Esta energía mecánica es posteriormente transformada a través de un generador en energía eléctrica.

La energía eléctrica posee múltiples ventajas, como por ejemplo:

1. El viento es un recurso inagotable
2. El desarrollo de la energía eólica, como energía renovable, juega un papel muy importante en la lucha contra el cambio climático ya que no crea gases de efecto invernadero ni produce desechos tóxicos o radiactivos.
3. Actualmente, el coste de la energía necesaria para la producción de electricidad a partir del recurso natural del viento, se ha convertido en una energía competitiva con el resto de fuentes de energía fósil en numerosas regiones alrededor del globo mundial.

Sin embargo, la energía eólica tiene numerosos desafíos a afrontar en el futuro y uno de ellos es la dificultad para predecir la cantidad de energía obtenible y también que es rápidamente fluctuante. La intermitencia y la imprevisibilidad de la producción de la energía eólica constituyen dos de los problemas principales para su implantación en los sistemas de producción de electricidad.



La energía eólica ha representado el 21% de las nuevas instalaciones de generación de electricidad en la Unión Europea en 2011, tras la energía solar fotovoltaica y el gas natural. A finales de 2011, la potencia eólica instalada en el mundo era de un total de 238GW, con un aumento de un 21% desde el año precedente, lo cual da una buena indicación del desarrollo mundial que se está realizando en la tecnología eólica.

Además, las previsiones para el futuro, son las de un aumento de la energía eólica instalada. En ello, influye sobre todo el acuerdo establecido entre los principales dirigentes europeos a fijar en un 20% la cantidad de energías renovables en el consumo de energía eléctrica para el año 2020.

## **GESTIÓN DE LOS PARQUES EÓLICOS**

El buen rendimiento de un parque eólico está totalmente ligado a la buena gestión técnica del mismo. El control del rendimiento de los aerogeneradores y la planificación de las operaciones de mantenimiento permiten optimizar la producción de un parque eólico. Entre los factores con una fuerte influencia en el funcionamiento del parque eólico: la topografía del terreno, las condiciones atmosféricas y la interacción entre las diferentes turbinas eólicas de un parque eólico.

Los costes de instalación de un parque eólico incitarían a construir las turbinas eólicas lo más próximas posibles entre unas y otras, sin embargo, esta situación no es óptima. Si la distancia entre dos aerogeneradores es muy próxima, la turbina eólica situada aguas abajo funciona en una atmósfera turbulenta y su duración de utilización estará fuertemente influenciada puesto que disminuirá. En el caso contrario en el que los dos aerogeneradores están más alejados, se pierde superficie útil. Por tanto, es muy importante tener en cuenta en la concepción e instalación de un parque eólico, la interacción aerodinámica entre las diferentes turbinas eólicas que forman el parque eólico a confeccionar. Determinar la distancia óptima permitirá acercarse al máximo rendimiento posible.

## **LA ESTELA DE LA TURBINA EÓLICA**



Un problema importante en las turbinas eólicas es la disminución de la velocidad del flujo situado aguas abajo de los aerogeneradores y el aumento del nivel de turbulencia cuando el flujo de aire pasa a través del rotor eólico. Este fenómeno conocido como: “la estela de la turbina eólica”, reducirá la potencia extraída de la turbina eólica situada aguas abajo. Además, es posible encontrar cargas dinámicas que pueden provocar un fenómeno de fatiga mecánica en los materiales que constituyen las palas del rotor eólico.

Es importante, aclarar que únicamente el flujo másico de aire que atraviesa el rotor de la turbina eólica se verá afectado. De este modo, la velocidad del aire a la salida del rotor disminuirá y con ello, lo hará también la energía cinética. Por tanto, habrá una clara diferencia entre la velocidad del flujo de aire a la entrada del rotor eólico y a la salida del mismo.

Por tanto, si un aerogenerador es situado en la estela de otra turbina, el viento que recibe ha cedido ya una buena parte de su producción de energía y no se estará obteniendo el máximo rendimiento de potencia a la turbina eólica. La simulación numérica permite cuantificar la pérdida de potencia que se produce en estos casos y concluir que esta disminución será mayor cuanto más próximas se encuentren los dos aerogeneradores analizados. Los estudios de concepción de los parques eólicos concluyen que hay un espaciamiento óptimo entre aerogeneradores para disminuir el impacto de este fenómeno. Está analizado que la distancia entre aerogeneradores debe encontrarse entre el rango de  $5D$ - $9D$  en la dirección de los vientos dominantes y de  $3D$ - $5D$  en la dirección perpendicular al viento, donde  $D$  representa el diámetro del rotor aerodinámico.

## LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

La experimentación en materia de aerogeneradores en túneles de viento es limitada a un número reducido de turbinas eólicas, por razones de espacio y como consecuencia de la no-uniformidad del campo de velocidades. Por tanto, es muy complicado simular la geometría real de las palas de varias turbinas al mismo tiempo y como consecuencia, imposible de simular un parque eólico completo.

Es en este punto que se incluye el interés del presente proyecto, puesto que si se utiliza un modelo híbrido que represente equivalentemente la geometría real de los rotores eólicos, podremos analizar el flujo de aire alrededor de las palas eólicas, tanto aguas





arriba como aguas abajo. Este modelo híbrido debe reemplazar al rotor eólico mediante las cargas de volumen o de superficies para aplicarlas a la simulación numérica y con ello, el efecto que crea en el flujo deberá ser idéntico al que cree la geometría real.

Si los cálculos se realizasen utilizando directamente las ecuaciones de Navier-Stokes sobre la geometría real de las palas, obtendríamos resultados enormemente precisos y muy satisfactorios, sin embargo, la potencia de cálculo necesaria para realizar esto sería enorme y hace imposible su utilización en el caso de los parques eólicos.

## **EL LÍMITE DE BETZ**

El coeficiente de potencia se define como la relación entre la potencia transmitida por el aerogenerador y un valor de referencia que corresponde a la potencia disponible del viento aguas arriba de la turbina eólica. En energía eólica hay un valor extremadamente importante que es el “Limite de Betz”, que representa el valor teórico máximo de potencia que es posible extraer de una turbina eólica y que corresponde al 59,3% de la energía cinética del viento incidente en el aerogenerador. Además, este valor se obtiene con la relación de velocidades a la salida de la turbina y la velocidad incidente del viento de un tercio. Esta limitación, provoca que no exista ningún campo eólico capaz de convertir una cantidad de energía mecánica superior a dicha cantidad de energía cinética que es posible extraer en los aerogeneradores, simplemente por cuestiones aerodinámicas del flujo de aire que atraviesa la turbina eólica y no por una mala concepción o diseño del parque eólico en cuestión.

## **LA TEORIA DEL ELEMENTO DE PALA (BEM)**

La teoría del elemento de pala, conocida como: “Blade Element Momentum (BEM)” está basada en la división del flujo de aire alrededor de la turbina eólica en volúmenes de control independientes que se extienden en el espacio entre el infinito aguas arriba y el infinito aguas abajo, con respecto al rotor. Estos volúmenes de control, aplicamos las ecuaciones de cantidad de movimiento y de energía de mecánica de fluidos.

Definimos las siguientes expresiones que nos permitirán obtener las fuerzas aerodinámicas de arrastre y de sustentación en cada elemento de pala:



$$dD = \frac{1}{2} \rho W^2 C_D c dr$$

$$dL = \frac{1}{2} \rho W^2 C_L c dr$$

De este modo, se podrá posteriormente determinar las características aerodinámicas del rotor, por ejemplo, la fuerza axial aplicada a la pala en cuestión y la potencia extraída del rotor eólico.

La principal limitación de este método es que no tienen en cuenta la ralentización que se produce en el flujo de aire tras el paso por el aerogenerador y al no tener en cuenta esta reducción de velocidad para los cálculos de las características aerodinámicas, no se obtienen buenos resultados. A pesar del reducido tiempo de cálculo requerido, los resultados de modelización obtenidos por este método no son muy satisfactorios para establecer el modelo del flujo alrededor del aerogenerador.

## MODELOS HIBRIDOS EXISTENTES

Los modelos híbridos desarrollados hasta la actualidad, utilizan la teoría del elemento de pala acompañados de un método para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Como hemos indicado ya anteriormente, estos modelos representan el mismo efecto que el que tendría la geometría completa del rotor eólico.

- **MODELO DE DISCO ACTIVO:**

Es el modelo más simple y en el cual se reemplaza la geometría del rotor real por un disco de diámetro  $D$  infinitamente delgado (normalmente, se utiliza un disco con espesor nulo con el objetivo de transformar el elemento volumétrico en un elemento superficial y de este modo, reducir el problema analizado a un caso de 2D más fácil de tratar mediante simulación numérica en FLUENT) que genera un flujo equivalente al flujo medio real. El fluido debe ser considerado como incomprensible, no viscoso y ligero.



El disco activo se caracteriza por ser definido como una superficie de discontinuidad de presión. Las cargas que se producen sobre la geometría real del rotor eólico son reemplazadas por las mismas fuerzas distribuidas sobre el disco activo.

Este método es ampliamente utilizado para prever el comportamiento de los aerogeneradores asimétricos y para representar bien la estela lejana de la turbina eólica. La principal limitación de este método es que solo se puede utilizar para prever el comportamiento de los aerogeneradores asimétricos. La segunda limitación es que este método distribuye los esfuerzos aerodinámicos sobre toda la superficie de las palas del rotor pero no permite representar cada pala del rotor de forma individual.

- **MODELO DE LINEA ACTIVA:**

Este método está diseñado para eliminar las limitaciones existentes en el modelo de disco activo que hemos analizado. En este caso, el modelo de línea activa tiene en cuenta el número de palas y por tanto, se puede representar cada pala del rotor eólico de forma individual. La geometría real de estos elementos se representa con el uso de una línea discretizada de  $N$  puntos donde las cargas son distribuidas según una distribución matemática específica (distribución gaussiana o distribución uniforme) alrededor de cada punto del eje de la pala en un plano perpendicular a la línea activa.

Uno de los métodos particular más importantes del método de la línea activa es el cilindro activo, en el cual se reemplaza cada pala del aerogenerador por un cilindro de longitud igual a la longitud de la pala en cuestión.

- **MODELO DE SUPERFICIE ACTIVA:**

Este modelo es el que se aproxima con mayor precisión a la realidad. La pala del aerogenerador es reemplazada por una superficie de discontinuidad de presión. La forma de la superficie simplificada es análoga a la superficie media de la pala. La discontinuidad de presión es la misma que la diferencia de presión entre el extradós y el



intradós. Este método representa con gran exactitud la estela próxima tras el aerogenerador.

#### ▪ MODELOS HIBRIDOS:

Utilizando los métodos de disco activo, del elemento de pala y de la línea activa, podemos representar diferentes tipos de rotores eólicos que se pueden encontrar en la actualidad en los parques eólicos. Los modelos híbridos se basan por tanto en los fundamentos aerodinámicos alrededor del perfil del alabe de la turbina eólica mediante un modelo simplificado de rotor eólico y un método de resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes que rigen la mecánica de fluidos; con el objetivo de encontrar el equilibrio perfecto entre la precisión de cálculo y el tiempo de cálculo necesario para la resolución de las ecuaciones que describen el proceso.

Los criterios para definir un modelo híbrido son variados y entre los más importantes podemos encontrar:

- a) *Presión constante*
- b) *Presión constante y fuerza axial constante*
- c) *Diferencia de presión aguas arriba y aguas debajo del aerogenerador*
- d) *Diferencia de presión aguas arriba y aguas debajo del aerogenerador y fuerza axial variable*

Para validar un modelo híbrido es necesario basarse en diversos criterios de validación como por ejemplo: el análisis preciso de la estela aerodinámica y turbulenta creada aguas debajo de la turbina eólica, el análisis de la potencia en función de la velocidad del viento y la determinación del tiempo de cálculo requerido para la simulación con el objetivo de reducirlo lo máximo posible.

## FLUENT Y GAMBIT



Fluent es un software utilizado para la modelización en mecánica de fluidos y que está basado en el método de los volúmenes finitos que permiten la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Sin embargo, para poder utilizar Fluent es necesario anteriormente, utilizar un software que trabaje sobre la definición de los volúmenes de control y su correspondiente mallado para su uso final en la resolución de las ecuaciones características de la mecánica de fluidos. Para ello, se utiliza el software Gambit que permite la generación de la geometría del alabe de un aerogenerador, definir los límites del volumen de control y realizar el correspondiente mallado superficial o volumétrico.

## EXPERIMENTOS REALIZADOS

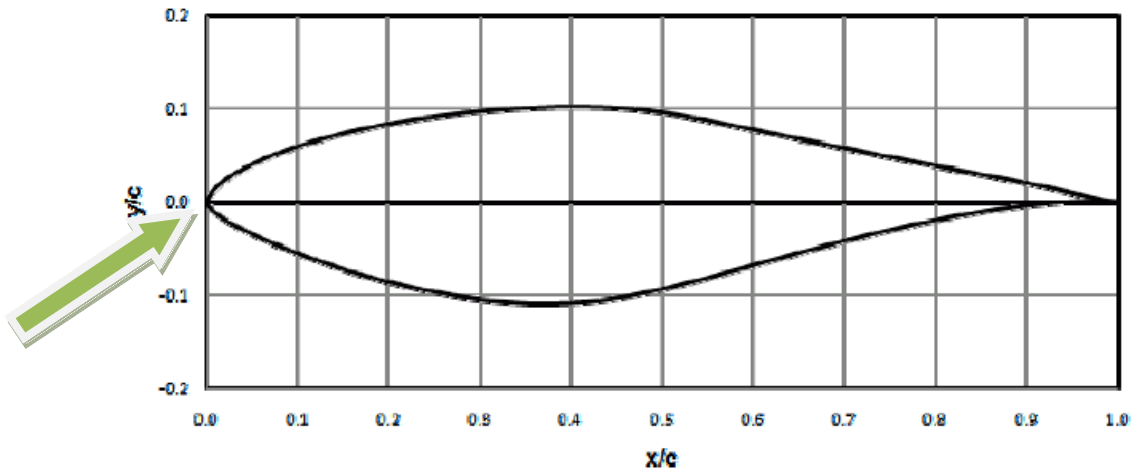
- **Simulación de un perfil aerodinámico S809**

La primera experimentación realizada fue la simulación del perfil aerodinámico S809. Este perfil tiene un espesor máximo del 21% de la cuerda del mismo y es especialmente concebido y utilizado para los aerogeneradores de eje horizontal.

Teniendo en cuenta una velocidad de incidencia del viento en la turbina eólica de 10m/s y una longitud característica del sistema de valor igual a la cuerda del perfil (que suponemos la unidad), podemos obtener el numero de Reynolds de  $6,85 \cdot 10^5$ .

La simulación en Fluent fue realizada para ocho diferentes ángulos de incidencia del viento con respecto al eje que define la cuerda del perfil aerodinámico: 5,13°; 15,23°; 20,16°; 30,2°; 40°; 50°; 70°; 90°.

### S809 Airfoil



El modelo de turbulencia utilizado fue k- $\omega$  SST. La simulación numérica permitió la obtención de los valores de cargas aerodinámicas de arrastre y de sustentación en cada elemento de pala.

Mediante la comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación numérica en Fluent y los resultados obtenidos en los experimentos realizados en colaboración con la Universidad de Delft (Holanda) para un número de Reynolds de un millón, hemos podido validar la simulación numérica realizada de la geometría completa del perfil aerodinámico S809.

- **Simulación de un perfil aerodinámico NACA 0015**

La segunda experimentación realizada consistió en la simulación de la geometría real de la pala de un rotor eólico compuesto de perfiles aerodinámicos NACA 0015. Estos perfiles son simétricos y como su propio nombre indica explícitamente, tienen un espesor máximo del 15% la cuerda del perfil propiamente dicho.

El primero paso fue la exportación de las coordenadas que definen el perfil aerodinámico (esta información se puede obtener de documentos sobre los perfiles aerodinámicos utilizados actualmente en la industria) a Gambit y de este modo poder



crear la forma de dicho perfil. En este caso, la cuerda del perfil es la unidad y por tanto, la expresión  $x/c$  se simplifica y representa directamente la coordenada  $x$ .

El segundo paso, es la definición del volumen de control alrededor del perfil aerodinámico que será utilizado posteriormente para la simulación numérica del mismo. Además del volumen de control que engloba al perfil aerodinámico, se diseñaron un conjunto de diez superficies de control para tener la posibilidad posteriormente de determinar la estela próxima aguas abajo de la turbina eólica. Además, la entrada al volumen de control es definida por la velocidad de incidencia del flujo de aire en el perfil (utilizada habitualmente para flujos incompresible cuando la velocidad incidente es conocida) y la salida del volumen de control es definida por la presión en dicho punto. El extradós y el intradós son considerados como paredes, elementos sólidos, que se caracterizan porque la velocidad del flujo de aire en el punto perteneciente al límite con la pared es nula.

El tipo de mallado utilizado fue un mallado cuadrangular estructurado (Quad-Map) con un intervalo de tamaño dependiente de la precisión exigida. Este mallado, será más concentrado en las zonas próximas del perfil aerodinámico y ello nos permitirá obtener resultados más precisos alrededor del perfil analizado.

A continuación, el mallado ha sido exportado al software Fluent y con ello, se inicio el estudio del comportamiento del flujo alrededor del perfil simétrico NACA 0015, con una velocidad del aire muy lejos del perfil aerodinámico de 10m/s.

En ausencia de ángulo de incidencia, el perfil presenta una distribución simétrica de presiones y donde se concluye que la carga de sustentación es nula. Esta carga solo será diferente a cero en los casos en los que el aire incida en el perfil con cierta inclinación y con un ángulo de incidencia diferente a cero.

El modelo de resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes es k- $\omega$  SST, compuesto por dos ecuaciones. Se trata de un modelo turbulento que suministra resultados bastante



precisos y que es muy utilizado para analizar el flujo alrededor de perfiles aerodinámicos.

Por último, se ha realizado una amplia comparación entre los valores de velocidad en función de los diferentes ángulos de incidencia analizados. La existencia del perfil aerodinámico tendrá una influencia importante en la velocidad del flujo de aire. Desde un punto de vista general, la velocidad disminuirá cuando la corriente de aire se aproxima al borde de ataque del perfil aerodinámico, donde la velocidad es nula. Por lo tanto, el flujo de aire se ralentiza a medida que percibe la existencia del perfil aerodinámico.

En el caso del ángulo de incidencia nulo, tendremos un campo de velocidades simétrico con respecto al eje que define la cuerda del perfil aerodinámico que une el borde de ataque y el borde de salida del mismo. Este campo de velocidades tiene estas características debido a la condición simétrica del perfil analizado.

En el caso opuesto, con ángulo de incidencia  $90^\circ$ , la distribución de velocidades es casi simétrica con respecto al eje perpendicular a la cuerda del perfil.

Analizando el extradós, podemos concluir que mientras el ángulo de incidencia es pequeño, las velocidades en el extradós cerca del borde de ataque (borde de entrada al perfil) son más elevadas que la velocidad al infinito aguas abajo (velocidad del flujo de aire sin verse afectado por la presencia de perfiles aerodinámicos). Esta región disminuirá a medida que el ángulo de incidencia aumente. Por otro lado, las velocidades en el extradós en el borde de salida del alabe son inferiores a la velocidad aguas abajo.

Analizando el intradós, podemos concluir que mientras el ángulo de incidencia es pequeño, las velocidades en el intradós cerca del borde de ataque son inferiores a  $V_\infty$ .

Por otro lado, también se realizó un análisis exhaustivo de la presión según los diferentes ángulos de incidencia analizados

- **Comparación de los coeficientes de presión obtenidos:**

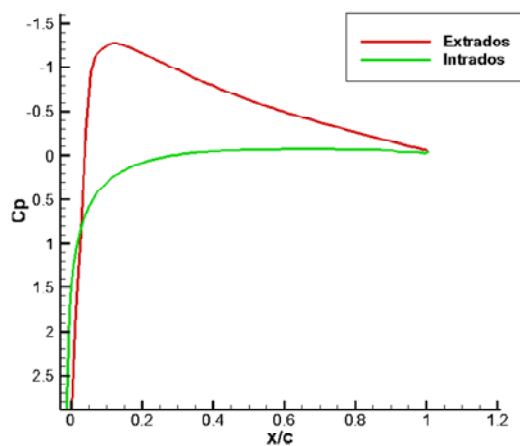




En esta experiencia, se trató la exportación de los valores de la presión estática a partir de los valores obtenidos en la simulación numérica realizada en Fluent para el caso del perfil aerodinámico NACA 0015, con el objetivo de comparar estos valores con las experimentaciones realizadas en el seno del laboratorio de Mecánica de Fluidos de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers.

La simulación fue realizada bajo las mismas condiciones que las que se utilizaron en el túnel del viento del laboratorio. Mismo perfil aerodinámico (NACA 0015), misma velocidad de flujo de aire (por lo tanto, mismo número de Reynolds) y mismo ángulo de incidencia.

Los coeficientes de presión  $C_p$  se pueden calcular con la siguiente expresión:



$$C_p = \frac{\text{Pression statique}}{\text{Pression dynamique}} = \frac{p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2}$$

- **Validación del modelo de placas:**



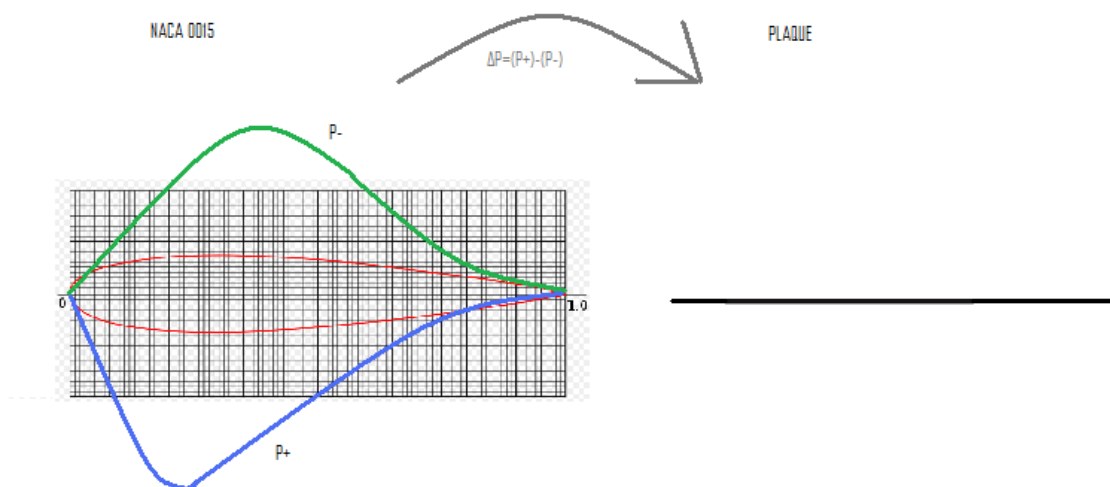
En este caso, se utilizará un modelo híbrido constituido por una placa y se intentará determinar el nivel de similitud de las distribuciones de velocidad y presión obtenidas utilizando este modelo simplificado y los que se obtendrían con el perfil aerodinámico.

Para ello, tras los resultados de la simulación numérica realizada anteriormente para el perfil aerodinámico NACA 0015, hemos extraído los valores de presión estática en el intradós y en el extradós en función del valor que toma la relación  $x/c$ . Sin embargo, para poder realizar correctamente la comparación, es necesario realizar una interpolación con el objetivo de tener los mismos puntos de cálculo  $x/c$  en el intradós y en el extradós.

Posteriormente, con los valores de la presión estática tanto para el intradós como para el extradós podemos calcular la diferencia de presión entre ambos para cada valor de la relación  $x/c$ .

$$\Delta P = P_{\text{Intradós}} - P_{\text{extradós}}$$

Por último, estos valores calculados son importados al modelo de la placa y con ello podemos comparar los campos de velocidad con el objetivo de validar el modelo de la placa desarrollado.





Para ello, hemos utilizado los UDF's (User Defined Functions) que están implementadas directamente en Fluent, con la idea de compilar los programas escritos en el lenguaje de programación C++.

## CONCLUSIÓN

El objetivo principal del proyecto fin de carrera fue el desarrollo de un modelo híbrido que represente equivalentemente al rotor eólico, que pueda ser utilizado para el estudio del conjunto de un parque eólico, reduciendo significativamente el tiempo de cálculo.

Durante el proyecto, se ha realizado dos principales comparaciones: la modelización de la geometría real de las palas del rotor y la modelización de la geometría simplificada con la utilización de modelos híbridos.

La modelización de la geometría real puede resultar válida para el análisis aerodinámico de los rotores eólicos individuales pero no podría ser concebido para ser tratada para el estudio global de varias turbinas eólicas al mismo tiempo como ocurre en los parques eólicos, puesto que el tamaño de simulación en cuanto a tiempo sería inabordable con los actuales medios existentes.

La segunda modelización permite un mejor compromiso entre la precisión y el tiempo de cálculo requerido para la simulación.

La utilización de software como Gambit, Fluent, C++, UDF's nos permite trabajar con estos casos simplificados para comprender cuál es el comportamiento del flujo de aire alrededor del modelo híbrido que representa la geometría real de las palas del rotor eólico.

Este trabajo se enmarca en el desarrollo de la energía eólica como fuente de energía competitiva en la producción de electricidad y por ello, el desarrollo de estos métodos ayuda a mejorar el rendimiento de los parques eólicos y con ello, aumentar el rendimiento de la energía eólica. De este modo, la energía eólica se puede convertir en una potente fuente de energía para cubrir los acuerdos establecidos entre las principales naciones europeas en cuanto a su desarrollo.



Universidad  
Carlos III de Madrid



# « Utilisation d'un modèle hybride afin d'accélérer la simulation numérique d'une éolienne »

Projet : PA-F12093



Élève : Daniel CARCIENTE DE BLAS

Tuteurs : M. Fawaz MASSOUH

M. Ivan DOBREV

École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers-  
Paris, FRANCE

26/06/2012



## NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

**ANNEE :** 2012

**N° de PE :** PA-F12093

**CENTRE DE RATTACHEMENT PE :** Arts et Métiers Paris-Tech Paris

**AUTEUR :** Daniel CARCIENTE DE BLAS

**TITRE :** « *Utilisation d'un modèle hybride afin d'accélérer la simulation numérique d'une éolienne* »

**ENCADREMENT DU PE :** M. Fawaz MASSOUH, M. Ivan DOBREV

**NOMBRES DE PAGES :** 53

**NOMBRE DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :** 10

**RESUME :** Issu d'une activité de recherche au laboratoire de Mécanique des Fluides à l'ENSAM, le PE proposé porte sur le développement d'un modèle équivalant au rotor éolien, sans être obligé de représenter la géométrie réelle des pales, ni modéliser la couche limite. L'utilisation de ce modèle hybride dans un calcul de simulation améliorera le temps de calcul significativement. De cette manière, on pourra simuler plusieurs éoliennes et l'optimisation d'un parc éolien.

**MOTS CLES :** Sillage éolien / Limite de Betz / Modèle hybride / Simulation numérique / Ligne active.

PARTIE A REMPLIR PAR LE PROFESSEUR RESPONSABLE DU PROJET

ACCESSIBILITE DE CE RAPPORT (entourer la mention choisie) :

Classe 0 = accès libre

Classe 1 = Confidentiel jusqu'au \_ \_ \_ \_ \_

Classe 2 = Hautement confidentiel

Date :

Nom du signataire :

Signature :

## Sommaire

<b>1.</b>	<b>Liste de Symboles .....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Présentation du Projet « Utilisation d'un modèle hybride afin d'accélérer la simulation numérique d'une éolienne » .....</b>	<b>6</b>
	2.1. Contexte du Projet .....	6
	2.2. Description du Projet .....	6
	2.3. Déroulement du Projet .....	6
	2.4. Remerciements .....	6
<b>3.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>8</b>
<b>4.</b>	<b>La Gestion des Parcs Eoliens .....</b>	<b>10</b>
	4.1. Le sillage éolien.....	10
	4.2. La simulation numérique .....	11
	4.3. Le limite de Betz.....	11
	4.4. La théorie de l'élément de pale (BEM) .....	12
	4.5. Les modèles hybrides existants .....	13
	4.6. Validation des modèles hybrides .....	15
<b>5.</b>	<b>L'apprentissage de Fluent et Gambit .....</b>	<b>16</b>
<b>6.</b>	<b>Expériences Réalisées .....</b>	<b>16</b>
	6.1. Première expérience : Simulation d'un profil S809.....	16
	6.2. Seconde expérience : Simulation du profil NACA 0015 .....	18
	6.3. Troisième expérience : Comparaison des coefficients de pression .....	33
	6.4. Quatrième expérience : Validation du Modèle de Plaque .....	34
	6.5. Dernière expérience : Programmation en C++ .....	41
<b>7.</b>	<b>Conclusion finale .....</b>	<b>46</b>
<b>8.</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>47</b>
<b>9.</b>	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>51</b>



## 1. Liste de Symboles

$C_p$	Coefficient de puissance [Adimensionnel]
$C_{p_{max}}$	Coefficient de puissance maximum [Adimensionnel]
$V_1$	Vitesse en amont (m/s)
$V_2$	Vitesse en aval (m/s)
$V_s$	Vitesse moyenne du vent qui traverse la surface balayée par le rotor éolien (m/s)
$m$	Débit massique (kg/s)
$\rho$	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
$A$	Surface (m <sup>2</sup> )
$D \equiv F_D$	Forces aérodynamiques de traînée (N)
$L \equiv F_L$	Forces aérodynamiques de portance (N)
$C_D$	Coefficient de traînée [Adimensionnel]
$C_L$	Coefficient de portance [Adimensionnel]
$c$	Corde du profil (m)
$W$	Vitesse relative (m/s)
$dr$	Différentiel de longueur (m)
$a$	Facteur d'induction axial [Adimensionnel]
$V_d$	Vitesse dans le plan du disque (m/s)
$Re$	Nombre de Reynolds [Adimensionnel]
$\mu$	Viscosité dynamique (Pa·s)
$D$	Longueur caractéristique ou diamètre du disque(m)
$V_\infty$	Vitesse à l'infini amont (m/s)
$\alpha$	Angle d'incidence de l'écoulement d'air (deg)
$P^-$	Pression à l'extrados (Pa)
$P^+$	Pression à l'intrados (Pa)
$p$	Pression statique (Pa)
$x/c$	Relation entre la coordonnée $x$ et la corde du profil [Adimensionnel]
$\Delta P$	Différence de pression (Pa)
$\omega$	Vitesse de rotation du rotor (rad/s)
$V$	Volume (m <sup>3</sup> )
$R$	Rayon du cylindre (m)
$r$	Rayon local (m)
$F_x$	Efforts dans la direction de l'axe X (N)
$F_y$	Efforts dans la direction de l'axe Y (N)
$f_x$	Efforts volumiques dans la direction de l'axe X (N/m <sup>3</sup> )
$f_y$	Efforts volumiques dans la direction de l'axe Y (N/m <sup>3</sup> )
$\lambda$	Vitesse spécifique [Adimensionnel]

## 2. Présentation du Projet « Utilisation d'un modèle hybride afin d'accélérer la simulation numérique d'une éolienne »

### 2.1. Contexte du Projet

Ce projet s'est déroulé de Janvier 2012 à Juin 2012, dans le cadre d'une activité de recherche menée au sein du laboratoire de Mécanique des Fluides de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris.

Dans un premier temps, j'ai travaillé en étroite coopération avec le doctorant du laboratoire, Mr. Asif MEMON, auteur de la thèse: *"Développement d'un modèle de surface active pour améliorer la représentation des charges aérodynamiques sur une pale éolienne"*.

J'ai ensuite travaillé avec le professeur Mr. Ivan DOBREV afin de développer un logiciel pour la simulation en 3D.

### 2.2. Description du Projet

L'objectif du projet était de développer un modèle équivalent du rotor éolien, qui puisse être implanté dans un calcul de simulation numérique, sans être obligé de représenter la géométrie réelle des pales, ni modéliser la couche limite. Dans ces conditions, la réduction significative du temps de calcul doit permettre la simulation de plusieurs éoliennes et l'optimisation de leur implantation dans un parc éolien.

### 2.3. Déroulement du Projet

Dans un premier temps, j'ai réalisé un travail de recherche bibliographique de tous les aspects de la gestion des parcs éolien, et de prise en main du travail déjà réalisé au sein du laboratoire.

J'ai également eu l'opportunité de suivre un cours introductoire aux logiciels de modélisation en mécanique des fluides FLUENT et de maillage GAMBIT, ce que m'a permis d'acquérir une bonne connaissance des logiciels développés dans les simulations.

Ainsi, sur la base de ces acquis, et avec l'aide des logiciels précédemment décrits, j'ai pu réaliser des comparaisons des cas expérimentaux.

Dans un deuxième temps, la suivante partie du projet a consisté à réaliser l'exportation des valeurs de la pression statique dans l'extrados et l'intrados à partir des simulations sur Fluent pour essayer de les comparer avec des expérimentations déjà faites dans des laboratoires ou des souffleries. J'ai finalement développé un logiciel en C++ permettant de déterminer les points proches d'un modèle de ligne active pour l'utiliser dans des simulations 3D et améliorer le temps de calcul. Cette exportation servira de base pour futurs travaux au sein du laboratoire.

### 2.4. Remerciements

Je tiens à remercier très chaleureusement à tous ceux qui, d'une façon ou d'une autre, m'ont aidé pendant mon travail dans ce projet.

Mes premiers remerciements vont à Monsieur Fawaz MASSOUH, en tant que tuteur, pour m'avoir encadrée et dirigée lors de mon projet. J'aimerais également remercier Monsieur Ivan DOBREV, professeur du Département d'Aérodynamique pour tous ses conseils et explications tout au long de l'étude, et Monsieur Asif MEMON, pour m'avoir si bien accueilli et m'avoir apporté ses conseils et connaissances techniques.

Merci enfin à toutes les personnes du laboratoire qui ont partagé ses connaissances et expériences sur le sujet, ainsi que de m'avoir soutenu tout au long du projet.

### 3. Introduction

L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui un véritable moyen industriel de production d'électricité. Cette énergie renouvelable est au cœur des enjeux mondiaux qui découlent de la volonté de nombreux pays de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

La filière éolienne a subi un très fort développement depuis le début des années 1990, en démontrant sa capacité à remplacer d'autres sources d'énergies, telles que le charbon ou le gaz naturel, dans la génération électrique.

Le principe de fonctionnement des aérogénérateurs est très simple : l'énergie cinétique de l'air est convertie en énergie mécanique de rotation grâce au système de captage aérodynamique que constituent les pales. Cette énergie mécanique est ensuite transformée, via une génératrice, en énergie électrique.

L'énergie éolienne possède des nombreux avantages :

- Le vent est une ressource inépuisable.
- Son utilisation joue un rôle très important dans la lutte contre le changement climatique : elle ne crée pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- Actuellement, le coût de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est devenu compétitif avec d'autres sources d'énergies fossiles dans de nombreuses régions du monde.

Cependant, le vent est difficilement prédictible et rapidement fluctuante. L'intermittence et l'imprévisibilité de la production éolienne constituent des problèmes majeurs pour son intégration dans les systèmes électriques.

Aujourd'hui, les nombreux progrès technologiques ont permis une utilisation optimale du vent et donc, une production d'énergie plus élevée et une importante réduction des coûts.

L'énergie éolienne a représentée 21% des nouvelles installations de génération électrique dans l'Union Européenne en 2011, après le solaire photovoltaïque et le gaz naturel (figure 1).

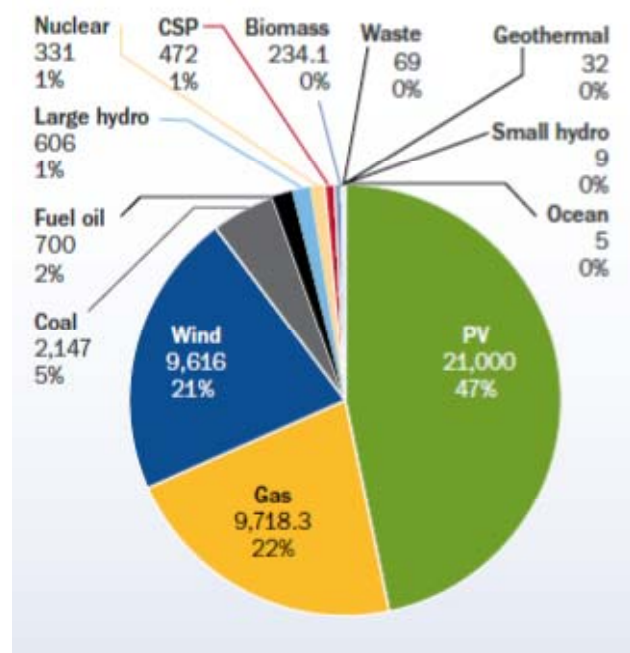


Figure 1 : Nouvelles installations de génération

électrique dans l'UE en 2011

Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), la puissance éolienne installée au niveau mondiale était de 238 GW fin 2011, après avoir subi une augmentation de 21% (+41 GW) par rapport à 2010 (croissance annuelle de 6%), menée principalement par la Chine (62 GW de capacité installée en 2011) et les Etats-Unis.

L'Europe reste le premier marché en termes de puissance installée (94 GW), suffisant pour alimenter le 6,3% de l'électricité de l'UE, selon l'European Wind Energy Association (EWEA). En 2011, les leaders européens en installation de nouvelles capacités éoliennes au niveau européen ont été : l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Espagne (figure 2).

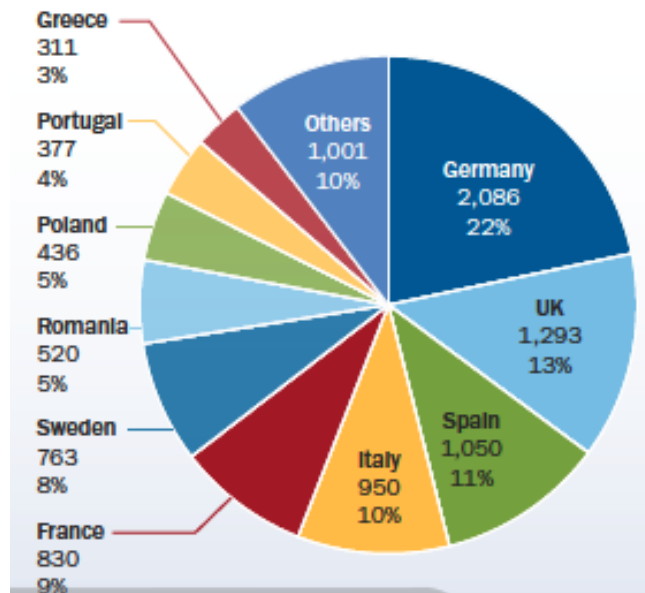


Figure 2 : Nouvelles capacités éoliennes installées dans l'Union Européenne en 2011 (total 9,6 GW)

La capacité mondiale d'énergie éolienne installée augmentera d'environ 12% d'ici 2015

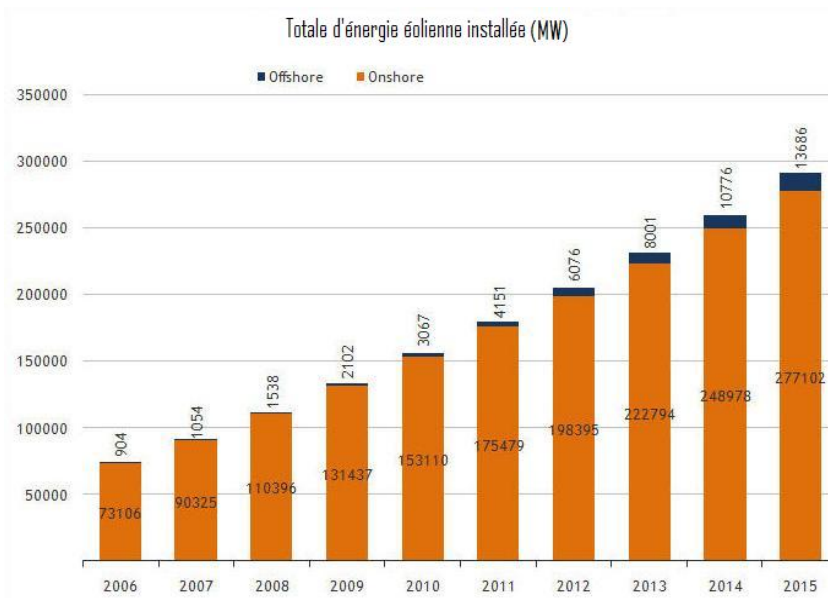


Figure 3 : Capacité mondiale d'énergie éolienne installée

Les dirigeants européens se sont engagés, en mars 2007, à fixer à 20% la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique globale d'ici 2020. Depuis, l'Europe a tout mis en œuvre pour développer cette stratégie. L'éolien est devenu ainsi la première filière de production électrique européenne en termes de nouvelle puissance installée avec une croissance importante, d'environ 30% par an depuis les dix dernières années.

Dans les années à venir, l'énergie éolienne est appelée à couvrir une part toujours plus importante des besoins mondiaux d'électricité.

## 4. La Gestion des Parcs Eoliens

La bonne performance d'un parc éolien est liée à sa bonne gestion technique. Le bon contrôle de la performance des aérogénérateurs et la planification des opérations de maintenance permettront d'optimiser la production d'un parc éolien.

Parmi les facteurs influençant le fonctionnement d'un parc éolien, on peut retrouver: la topographie du terrain, les conditions atmosphériques et l'interaction entre les éoliens.

Les coûts financiers du terrain et des infrastructures nécessaires dans un parc éolien pousseraient à construire des éoliens les plus proches possibles les uns des autres, cependant cette situation n'est pas optimale. Si la distance entre deux aérogénérateurs est très courte, l'éolien à l'aval fonctionne dans une atmosphère assez turbulente, et sa durée de vie se verra fortement diminuée. Au contraire, si les machines sont trop éloignées, on perd de la surface utile. En conséquence, l'élément le plus important à prendre en compte lors de la conception d'un parc éolien est l'interaction aérodynamique entre les éoliennes du parc. Leur positionnement optimal permettra d'obtenir le maximum rendement possible.

### 4.1. Le sillage éolien

Un problème important des éoliennes est la diminution de la vitesse de l'écoulement en aval de l'éolienne et l'augmentation du niveau de turbulence quand l'écoulement passe à travers du rotor. Ce phénomène, connu comme le **sillage éolien**, réduira la puissance de l'éolienne située en aval. On peut également retrouver des cargues dynamiques qui peuvent provoquer un phénomène de fatigue mécanique des matériaux, qui affectera à la durée de vie des pales.

Seulement la masse d'air qui passe à travers du rotor de l'éolienne disque est affectée : l'énergie cinétique se réduit et la vitesse de l'air qui s'approche au rotor diminue, suscitant une différence entre la vitesse en amont et en aval de l'éolienne.

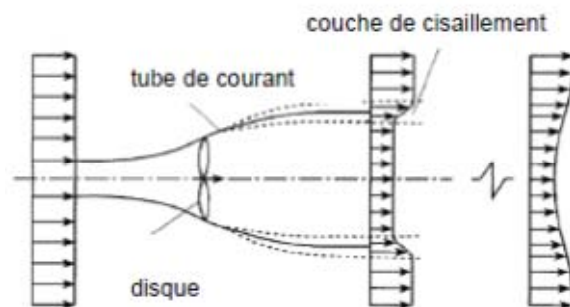


Figure 4 : Représentation du ralentissement en aval de l'éolienne

Dans ces circonstances, si une éolienne est située dans le sillage d'une autre, le vent, qu'elle reçoit, aura déjà cédé une bonne partie de sa production d'énergie, avec des répercussions sur la puissance. La simulation numérique démontre que la perte de puissance subie par une éolienne placée dans le sillage d'une autre diminue au fur et mesure la distance entre les éoliennes et la vitesse du vent à l'infini amont augmentent.

Les études de conception des parcs éoliens tiennent compte de l'espacement entre les éoliennes pour éviter la réduction de la vitesse. En général dans les parcs, les éoliennes sont identiques et la distance entre eux est donnée pour les constructeurs. Généralement, la distance entre les éoliennes se situe entre 5D et 9D dans la direction des vents dominants, et entre 3D et 5D dans la direction perpendiculaire au vent (où D est le diamètre de l'éolienne).

#### 4.2. La simulation numérique

Les expérimentations en soufflerie sont limitées à un nombre très réduit d'aérogénérateurs comme conséquence du non uniformité du champ de vitesse du parc éolien.

Il est donc très difficile de simuler la géométrie réelle de plus d'une éolienne en même temps. Cependant, la simulation numérique permet de représenter une géométrie réelle des rotors éoliens avec l'utilisation d'un modèle hybride, et de connaître l'écoulement d'air autour des pales des éoliennes

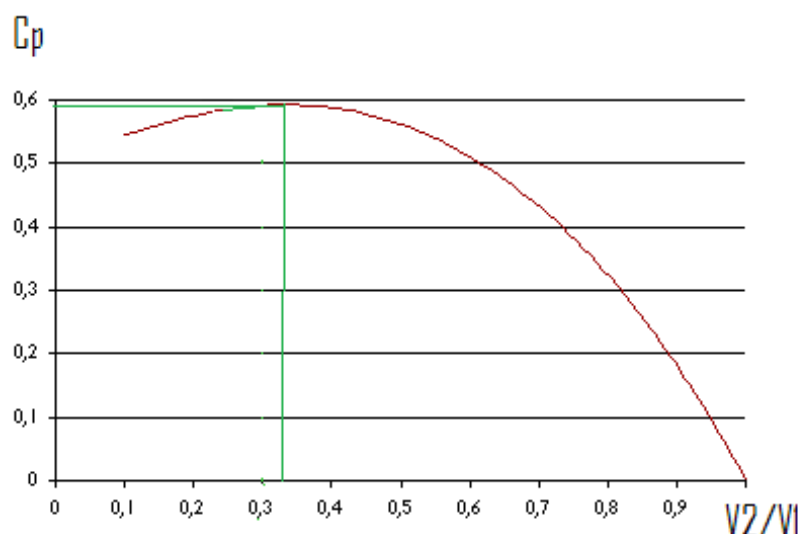
Le modèle hybride remplace le rotor éolien par des forces de volume ou de surface à l'intérieur du domaine de simulation numérique permettant d'accélérer le calcul. Il va créer le même effet sur l'écoulement que la géométrie complète du rotor éolien.

#### 4.3. Le limite de Betz

Le « **Coefficient de Puissance** » est défini comme le rapport entre la puissance transmise au disque actif et une valeur de référence qui corresponde à la puissance du vent amont traversant une surface égale à celle du disque actif. De la même manière, ce coefficient décrit le ratio entre la puissance du vent et celui qui est converti par la turbine.

$$C_p = \frac{\text{Puissance extraite}}{\text{Puissance disponible}}$$

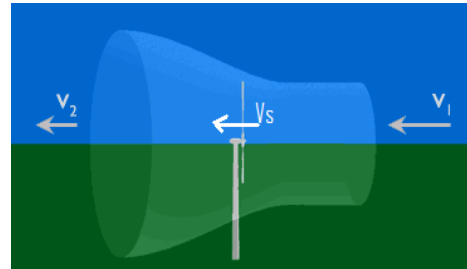
« **Le limite de Betz** » est la valeur maximale théorique de la puissance qu'on peut extraire d'une éolienne correspondant à 0,593 de l'énergie cinétique de l'écoulement incident ( $C_{pmax} = 16/27 = 0,593$ ) et il correspond approximativement à la relation des vitesses:  $V_2/V_1 = 1/3$ . Il n'existe pas un parc éolien capable de convertir en énergie mécanique supérieur à cette valeur de l'énergie cinétique extraite.



On suppose que la vitesse moyenne du vent traversant la surface balayée par le rotor éolien est égale à la moyenne de la vitesse du vent en amont ( $V_1$ ) et la vitesse en aval ( $V_2$ ):

$$V_s = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

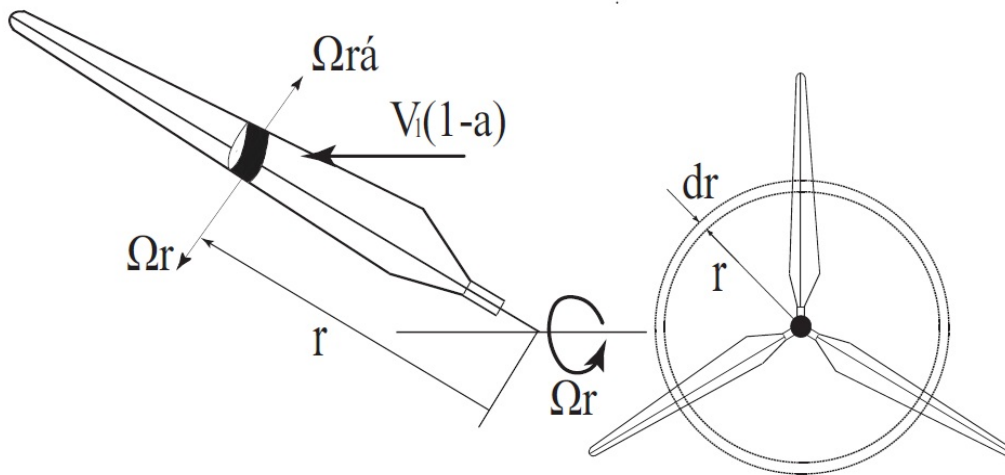
Ce limite n'est pas dû à un mauvais dessin ou à une mauvaise conception du parc éolien, sinon au phénomène que se produit quand le flux d'air traverse le rotor éolien. Ce flux d'air ( $m$ ) doit être constant entre l'amont et l'aval du rotor. Le dessin ci-joint représente le flux du tube. Etant donné que  $V_1 > V_2$ , la superficie du flux de tube  $A_1$  sera supérieure à  $A_2$ .



$$m = \rho \cdot V \cdot A \equiv cte \rightarrow V = \frac{m}{\rho \cdot A}$$

#### 4.4. La théorie de l'élément de pale (BEM)

La **théorie de l'élément de pale**, plus connue comme **Blade Element Momentum (BEM)**, est basée sur la division de l'écoulement en volumes de contrôles annulaires qui s'étendent de l'infini amont jusqu'à l'infini aval, par rapport au rotor, auxquels on applique les équations de quantité de mouvement et d'énergie.



Les suivantes expressions nous permettront d'obtenir les forces aérodynamiques de traînée et de portance dans chaque élément de pale:

$$dD = \frac{1}{2} \rho W^2 C_D c dr$$

$$dL = \frac{1}{2} \rho W^2 C_L c dr$$



On pourra ensuite déterminer les caractéristiques aérodynamiques de rotor, par exemple, la force axiale appliquée à la pale et la puissance du rotor.

Pourtant, un rotor éolien reçoit l'écoulement de l'air ralentisse comment on avait dit. Cette théorie ne prend pas en compte cette réduction de vitesse, et il ne donne pas des bons résultats. Il faut prendre en compte cette vitesse pour les calculs des caractéristiques aérodynamiques.

$$V_d = (1-a) \cdot V_1$$

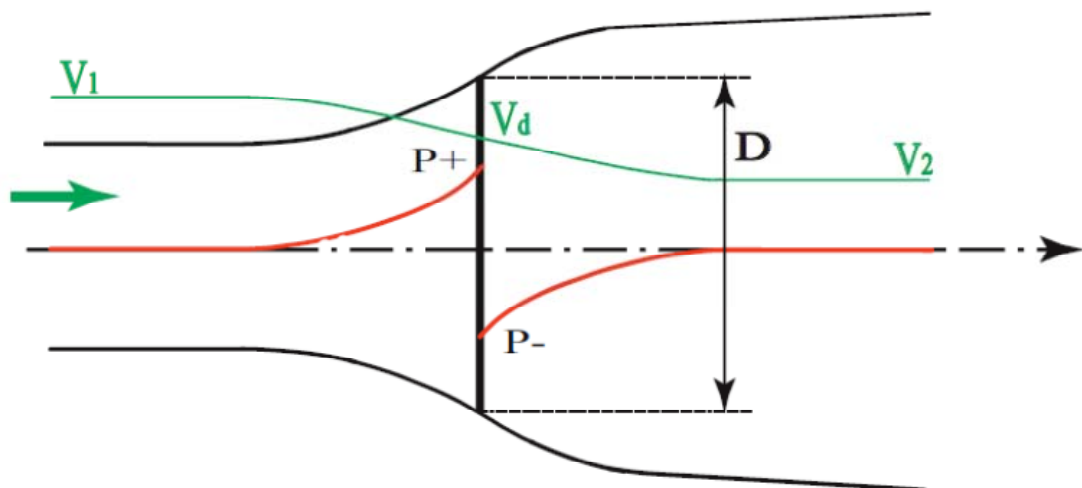
$$V_2 = (1-2a)V_1$$

#### 4.5. Les modèles hybrides existants

Les modèles hybrides utilisent la théorie de l'élément de pale et un solveur des équations de Navier-Stokes. Ils vont créer le même effet sur l'écoulement que la géométrie complète du rotor éolien.

Parmi les différents modèles hybrides utilisés pour la modélisation des rotors éoliens on distingue:

✚ **MODELE DU DISQUE ACTIF** : C'est le modèle le plus simple. On remplace le rotor réel par un disque de diamètre  $D$  infiniment mince (normalement, on utilise un disque avec une épaisseur nulle, permettant de transformer un élément volumétrique en un élément superficiel), qui génère un écoulement équivalent à l'écoulement réel moyen. Le disque actif est défini comme une surface de discontinuité de pression. On peut voir dans la figure ci-dessous, l'affectation qu'aura le disque dans l'écoulement : la vitesse se verra réduite et il y aura une discontinuité de pression. Le rotor est remplacé par des forces distribuées sur le disque.



Cette méthode permet de prévoir le comportement des éoliennes axisymétriques et il représente bien le sillage lointain. La construction des modèles hybrides est basée en l'application de la méthode de l'élément de pale sur le disque actif.

La principale limitation de cette méthode est qu'on peut seulement l'utiliser pour prévoir le comportement des éoliennes axisymétriques. Une deuxième limitation est qu'elle distribue les

efforts aérodynamiques sur toute la surface balayée par les pales du rotor et ne permet pas de représenter chaque pale de manière individuelle.

Il est donc nécessaire de faire un certain nombre d'hypothèses:

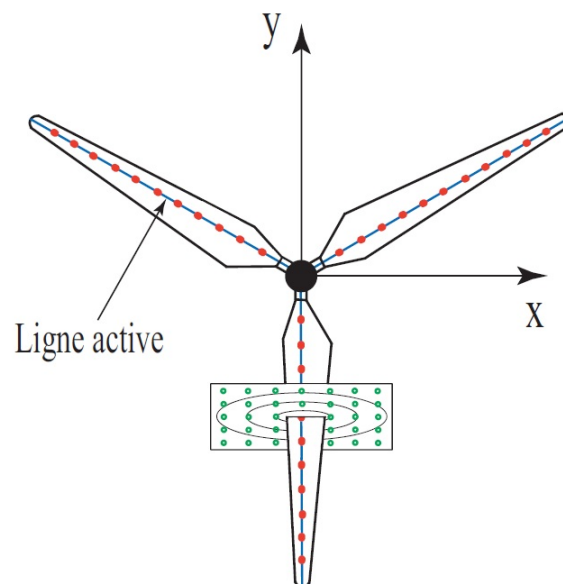
- La géométrie réelle du rotor n'est pas représentée: on ne considère qu'un disque d'épaisseur nulle et de diamètre  $D$ .
- Le fluide est considéré comme incompressible, non visqueux et non pesant.
- Les vitesses  $V_1$  (en amont du disque),  $V_d$  (dans le plan du disque) et  $V_2$  (en aval du disque) sont uniformes et axiales. On sait que :  $V_d = (1-a) \cdot V_1$  où le paramètre «  $a$  » est le facteur d'induction axial, qui est supposé constant. En plus, la vitesse à l'infini aval est :

$$V_2 = (1 - 2a)V_1$$

- L'énergie de l'écoulement est composée de l'énergie cinétique et l'énergie potentielle.

✚ **METHODE DE LA LIGNE ACTIVE** : Cette méthode a été créée pour éliminer les limitations du disque actif. Elle prend en compte le nombre des pales. On représente la géométrie réelle de chaque pale du rotor individuellement avec une ligne discrétisée de  $N$  points, où les forces sont distribuées selon une distribution spécifique (normalement on peut utiliser une distribution gaussienne ou une distribution uniforme comme dans le cas de cylindre actif) autour de chaque point de l'axe de la pale dans un plan perpendiculaire à la ligne active. Si on utilise la distribution gaussienne on peut trouver l'influence de quelques paramètres, tels que le nombre de Reynolds et la résolution de maillage, utilisés dans le processus de simulation de l'écoulement.

Un des modèles le plus importants de cette méthode de la ligne active est le cylindre actif, où on remplace chaque pale pour un cylindre de longueur égal à la longueur de la pale.



✚ **METHODE DE LA SURFACE ACTIVE** : C'est le modèle le plus proche de la réalité. La pale est remplacée par une surface de discontinuité de pression. La forme de la surface est analogue à celle de la moyenne de la pale. La discontinuité de pression est égale à la différence de pression entre l'extrados et l'intrados créée par la pale. Cette méthode a la particularité de bien représenter le sillage proche de l'éolien.

En utilisant les méthodes du disque actif, de l'élément de pale et de la ligne active, on peut représenter différents types de rotors de pales droites ou vrillées qu'on peut trouver dans les parcs éoliens réels. Des critères différents sont utilisés dans les modèles hybrides, par exemple :

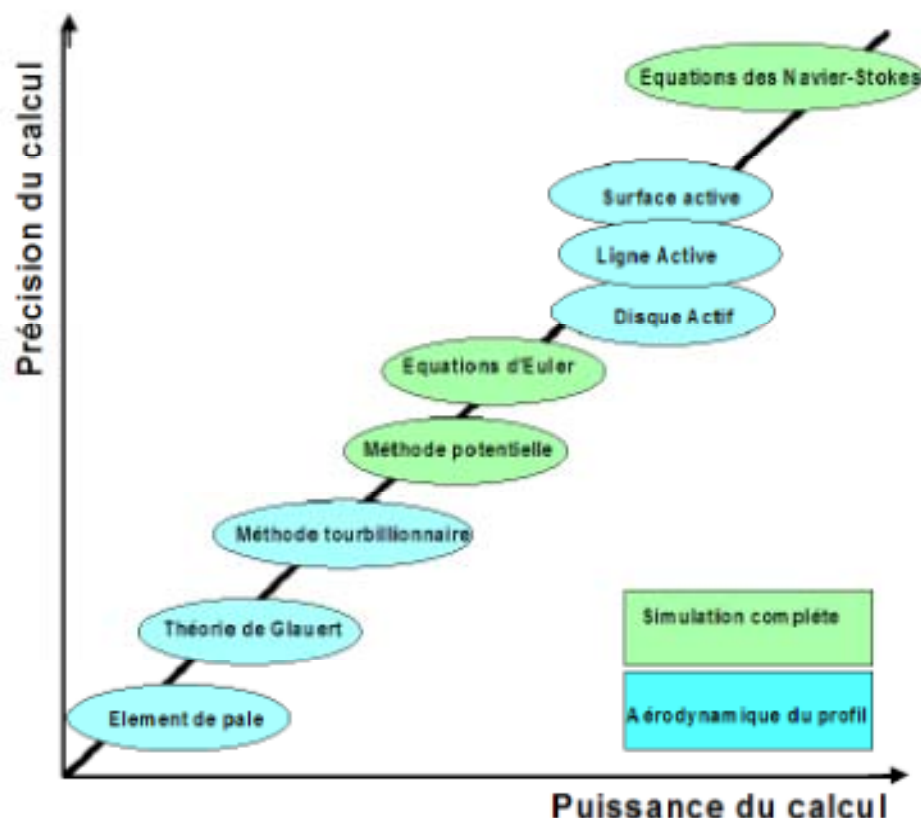
1. Pression constante.
2. Pression constante et Force axial constante.
3.  $\Delta P = P_2 - P_1$
4.  $\Delta P = P_2 - P_1$  et Force axial variable.

#### 4.6. Validation des modèles hybrides

L'utilisation de ces modèles hybrides est basée sur certains critères de validation : l'analyse précise du sillage éolien, l'analyse de la puissance en fonction de la vitesse du vent et la diminution du temps de calcul.

On doit faire une comparaison entre les résultats de calcul et les résultats expérimentaux afin de montrer la viabilité et l'efficacité du modèle hybride utilisé.

La figure ci-dessous représente les méthodes utilisées pour la modélisation d'écoulement à travers des éoliennes:



La méthode de l'élément de pale est la moins précise pour modéliser l'écoulement autour des éoliennes, malgré qu'elle a besoin de moins temps de calcul.

Bien que l'utilisation des équations de Navier-Stokes sur la géométrie réelle soit la méthode la plus précise, la puissance du calcul nécessaire impossibilité son utilisation dans le cas d'un parc éolien.

On utilise, donc, un modèle hybride basé sur l'aérodynamique du profil, qui mélange un modèle simplifié du rotor éolien et un solveur des équations de Navier-Stokes afin d'obtenir l'équilibre entre précision du calcul et puissance/temps de calcul. Parmi tous les modèles hybrides, celui de la surface active est le plus précis, sans nécessiter un temps de calcul important.

## 5. L'apprentissage de Fluent et Gambit

FLUENT est un logiciel de modélisation en mécanique des fluides. Il est basé sur la méthode des volumes finis, qui permet la résolution des équations de Navier-Stokes qui régissent les écoulements. Ce logiciel n'est que un solveur, il ne sert pas au maillage du système. C'est pour cela, que FLUENT est associé au logiciel GAMBIT, qui permet de générer la géométrie d'une éolienne, de définir les conditions aux limites du fluide à analyser et de réaliser le maillage superficiel et volumétrique.

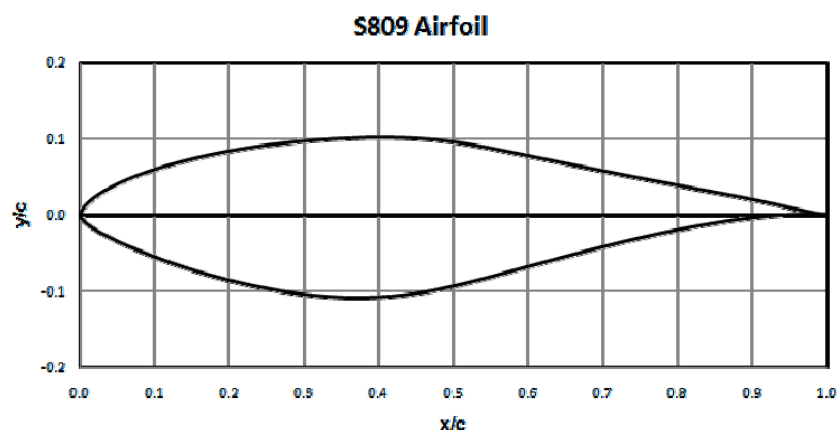
Au cours du premier trimestre, j'ai suivi un cours introductoire aux logiciels GAMBIT et FLUENT au sein de l'ENSAM, qui m'a permis d'acquérir une bonne connaissance des logiciels développés dans les simulations.

## 6. Expériences Réalisées

### 6.1. Première expérience : Simulation d'un profil S809

La première expérience consistait à réaliser une simulation d'un profil aérodynamique S809 fourni par Monsieur Assif, doctorant du laboratoire de L'ENSAM.

Le profil aérodynamique S809 a une épaisseur maximale de 21% la corde du profil et est spécifiquement conçu pour les éoliennes à axe horizontal.



La simulation a été seulement réalisée avec l'aide du logiciel FLUENT, étant donné que le maillage du volume de control était déjà fait.

Tenant compte une vitesse en amont de 10 m/s, et une longueur caractéristique du système D égale à la corde du profil (supposé l'unité), j'ai pu obtenir le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 10 \cdot 1}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 684587,012 = 6,85 \cdot 10^5$$

La simulation a été réalisée pour différents angles d'incidence de l'écoulement dans le profil (5.13° ; 15.23° ; 20.16° ; 30.2° ; 40° ; 50° ; 70° et 90°). Le modèle de turbulence employé a été le k-w SST.

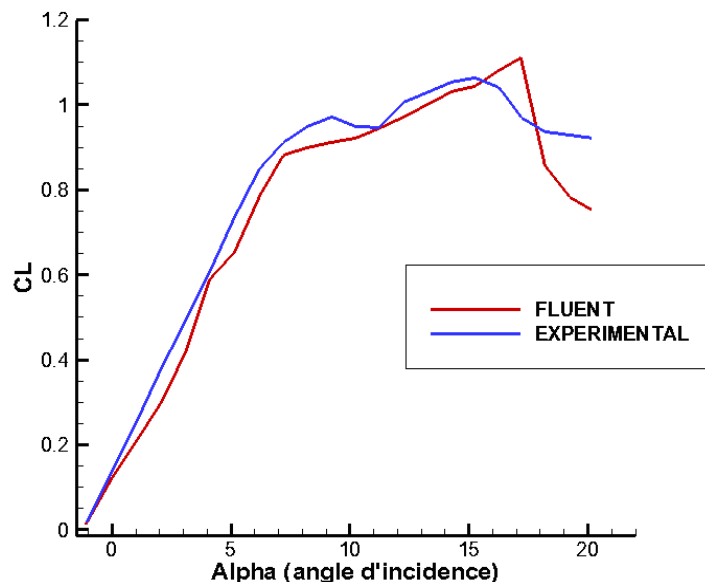
La simulation m'a permis d'obtenir les valeurs de la force de traînée et de la force de portance, utilisés pour déterminer, ensuite, les coefficients de traînée et portance grâce aux les expressions suivantes :

$$\text{COEFFICIENT DE PORTANCE } F_L = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot c \cdot C_L \rightarrow C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot c}$$

$$\text{COEFFICIENT DE TRAINNE } F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot c \cdot C_D \rightarrow C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot c}$$

A continuation, j'ai comparé les valeurs obtenues par simulation à l'aide du logiciel Fluent, et celles obtenues par expérimentation, à l'Université de Delft (Pays-Bas), pour un nombre de Reynolds égal à  $10^6$ . Cette comparaison m'a permis de valider la simulation réalisée de la géométrie complète du profil aérodynamique S809.

La figure suivante nous montre la comparaison de l'évolution des valeurs du coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence de l'écoulement dans le profil :



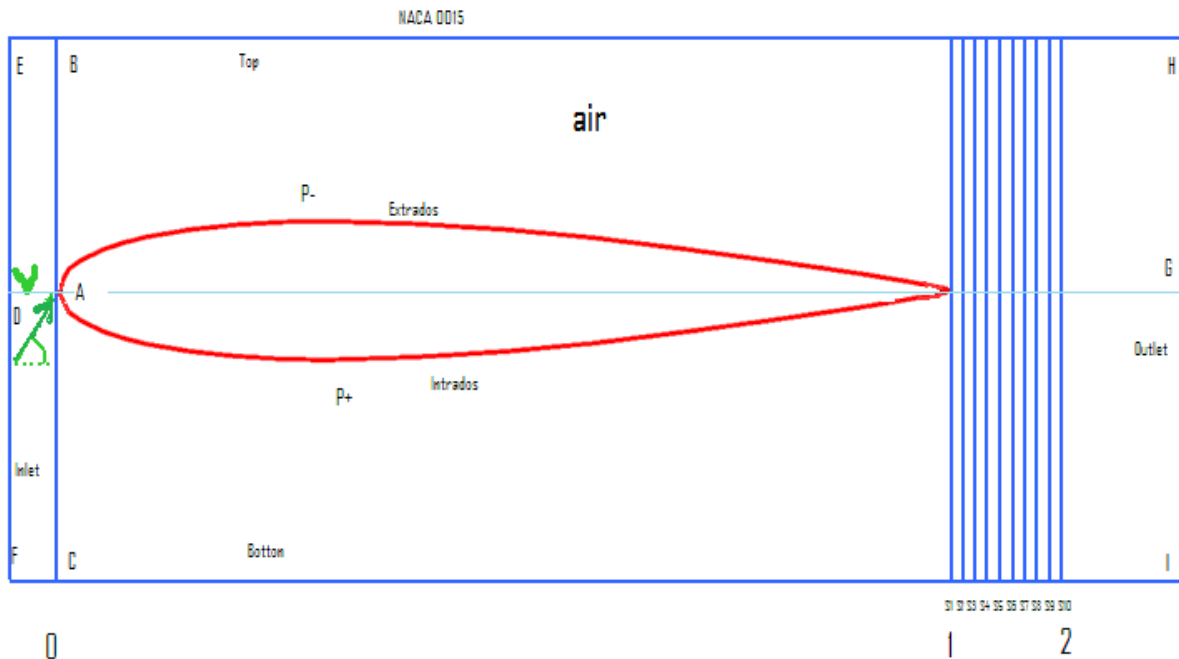
On peut observer que l'allure de la courbe est similaire avant le décrochage de l'écoulement. Par contre, aux valeurs supérieures à l'angle de décrochage (égal à d'environ 17°), on aperçoit des différences plus notables. Dans cette situation, la simulation ne sera pas de grande utilité, car elle ne représente pas la vraie réalité.

Bien que les valeurs expérimentales et celles obtenues par simulation ne soient pas les mêmes, leur comparaison nous aide à bien comprendre les résultats pour des angles inférieures au décrochage.

## 6.2. Seconde expérience : Simulation du profil NACA 0015

La deuxième expérience réalisée a été la simulation de la géométrie réelle de la pale d'une éolienne formée de profils symétriques NACA 0015. Ces profils ont une épaisseur maximale de 15% la corde du profil.

J'ai commencé par importer les coordonnées du profil NACA 0015 de l'éolienne sur le logiciel GAMBIT pour créer sa courbe, me permettant d'avoir la géométrie du profil aérodynamique choisi. Etant donné que la corde du profil (c) est d'environ 1m, la valeur de x peut être utilisée en tant qu'expression  $x/c$ .



Afin de déterminer le volume de fluide à utiliser, j'ai choisi les points et surfaces suivants dans la figure précédente:

Points	A	B	C	D	E	F
Coordonnées	(0, 0, 0)	(0, 20, 0)	(0, -20, 0)	(-10, 0, 0)	(-10, 20, 0)	(-10, -20, 0)

Points	G	H	I	S1	S1-sup	S1-inf
Coordonnées	(35, 0, 0)	(35, 20, 0)	(35, -20, 0)	(1.0080, 0, 0)	(1.0080, 20, 0)	(1.0080, -20, 0)

Points	S2	S2-sup	S2-inf	S3	S3-sup	S3-inf
Coordonnées	(1.1088, 0, 0)	(1.1088, 20, 0)	(1.1088, -20, 0)	(1.2096, 0, 0)	(1.2096, 20, 0)	(1.2096, -20, 0)

Points	S4	S4-sup	S4-inf	S5	S5-sup	S5-inf
Coordonnées	(1.3104, 0, 0)	(1.3104, 20, 0)	(1.3104, -20, 0)	(1.4112, 0, 0)	(1.4112, 20, 0)	(1.4112, -20, 0)

Points	S6	S6-sup	S6-inf	S7	S7-sup	S7-inf
Coordonnées	(1.5120, 0, 0)	(1.5120, 20, 0)	(1.5120, -20, 0)	(1.6128, 0, 0)	(1.6128, 20, 0)	(1.6128, -20, 0)

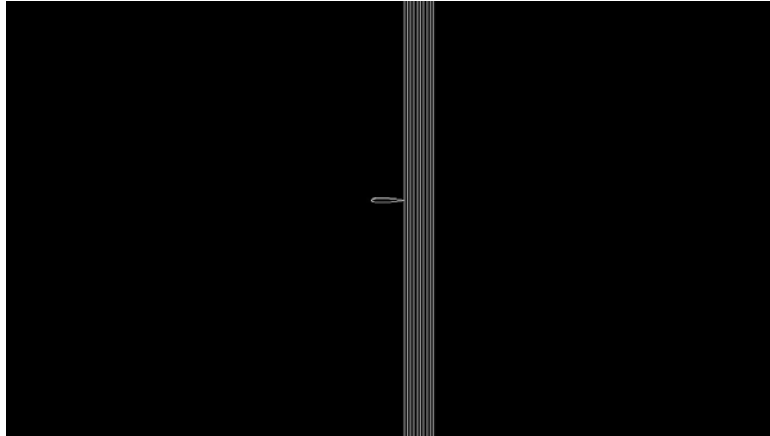
  

Points	S8	S8-sup	S8-inf	S9	S9-sup	S9-inf
Coordonnées	(1.7136, 0, 0)	(1.7136, 20, 0)	(1.7136, -20, 0)	(1.8144, 0, 0)	(1.8144, 20, 0)	(1.8144, -20, 0)

Points	S10	S10-sup	S10-inf
Coordonnées	(1.9152, 0, 0)	(1.9152, 20, 0)	(1.9152, -20, 0)

L'utilisation des surfaces de contrôle équidistantes S1, S2,..., S10 m'a permis de déterminer le sillage proche du profil et, d'avoir donc, plus de précision en aval du profil. Il faut bien visualiser le développement du sillage jusqu'à une distance égale à la corde.



J'ai également défini les conditions aux limites pour tous les cas précédents:

Limite du VF	Inlet (E-D-F)	Outlet (H-G-I)	Extrados	Intrados	Top	Bottom
Condition aux limites	Velocity inlet	Pressure outlet	Wall	Wall	Velocity inlet	Velocity inlet

Limite du VF	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Condition aux limites	Interior	Interior	Interior	Interior	Interior	Interior

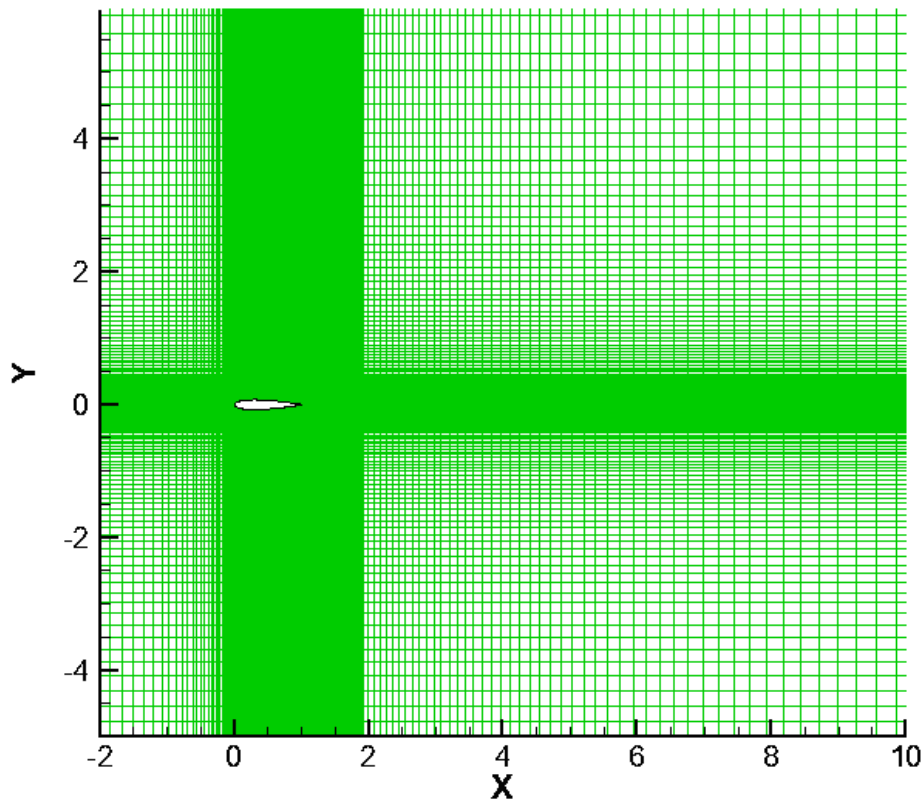
  

Limite du VF	S7	S8	S9	S10
Condition aux limites	Interior	Interior	Interior	Interior

La condition « velocity inlet » à l'entrée est très utilisée pour les écoulements incompressibles quand la vitesse d'entrée est connue. La condition « wall » est utilisée pour délimiter les régions solides.

Le fluide du travail est l'air, défini comme condition de continuité.

J'ai choisi un maillage quadrangulaire structuré (Quad-Map), avec un intervalle de grandeur variable dépendant de la précision requise. Ce maillage plus concentré près du profil nous permet d'avoir des résultats plus précis autour du même, tel y on peut observer dans le graphique suivant :



A continuation, j'ai procédé à l'exportation du maillage sur le logiciel Fluent, et à l'étude du comportement de l'écoulement (avec vitesse à l'infini amont de  $V_\infty=10\text{m/s}$ ) autour du profil NACA 0015 symétrique. En l'absence d'incidence de l'écoulement, il présente une répartition symétrique des pressions, la portance sera donc nulle. La portance apparaît quand l'angle d'incidence est différent de  $0^\circ$ .

Le modèle solveur utilisé est de type « Pressure based », très approprié pour les écoulements incompressibles, et « Steady » car il s'agit d'un écoulement stationnaire.

Pour modéliser l'écoulement turbulent j'ai choisi le modèle  $k-\omega$  SST (deux équations). Ce modèle de turbulence, connu par ses bons résultats, est largement utilisé dans la modélisation de l'écoulement autour des profils ou des rotors éoliens.

La simulation a été faite pour différents angles d'incidence ( $\alpha$ ), en utilisant dix mille itérations par chaque angle d'incidence. J'ai choisi un numéro aléatoire très grand afin d'être sûr d'obtenir la convergence des différents résidus. Les résidus ont été calculés à partir des corrections dans les variables du problème entre l'itération ( $i+1$ ) et l'itération  $i$ .

Les vitesses ( $V_x$  et  $V_y$ ) pour chaque angle d'incidence viennent définies par :

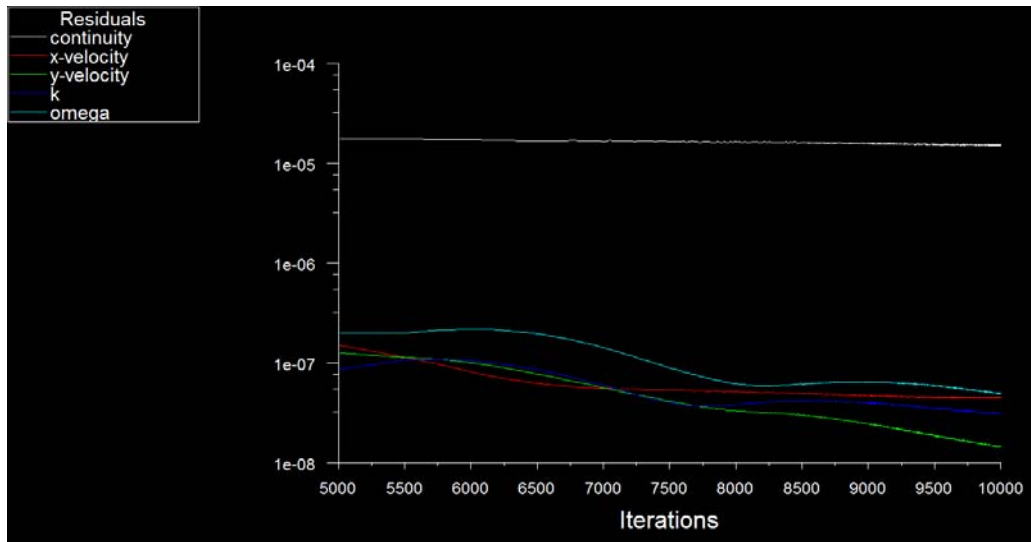
$$V_x = V_\infty \cdot \cos(\alpha)$$

$$V_y = V_\infty \cdot \sin(\alpha)$$

Angle d'incidence ( $^\circ$ )	0	5,13	10,2	15,23	20,16	30,2	40	50	70	90
$V_x$ (m/s)	10	9,95994	9,84196	9,6488	9,38734	8,64275	7,66044	6,42788	3,4202	0
$V_y$ (m/s)	0	0,89416	1,77085	2,62694	3,44643	5,0302	6,42788	7,66044	9,39693	10



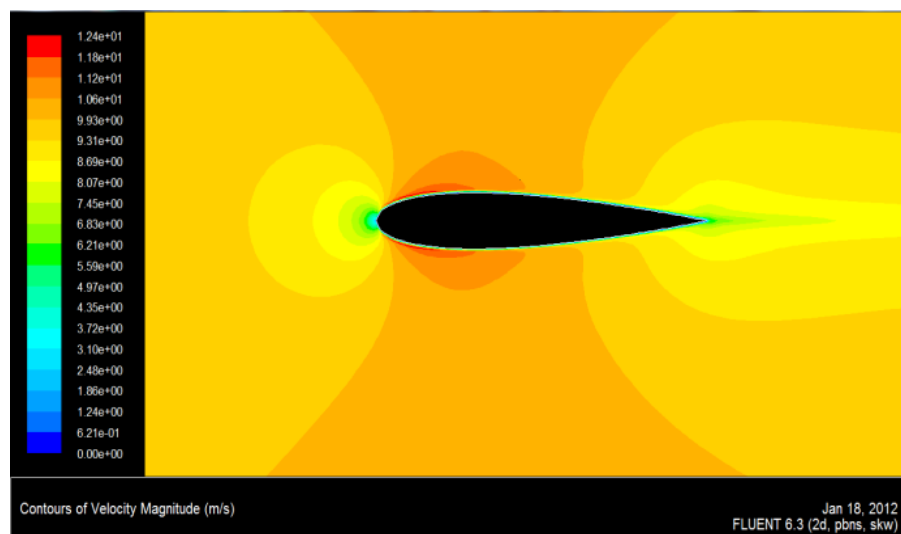
La figure ci-dessous est un exemple de la courbe de convergence pour l'angle d'incidence  $10.2^\circ$ . On peut observer que le résidu qui correspond à la solution de l'équation de continuité est horizontal, résultat qu'on voulait obtenir.



### 6.2.1. Comparaison des Champs de Vitesses en fonction de différents angles d'incidence

La vitesse à l'infini amont est  $V_\infty = 10 \text{ m/s}$ . L'existence d'un profil aérodynamique influencera cette vitesse. D'un point de vue général, la vitesse diminue quand l'écoulement s'approche du bord d'attaque, où la vitesse est nulle. Cela veut dire que l'écoulement s'est ralenti au fur et mesure il perçoit le profil. On doit souligner qu'il y a une couche autour de l'aile avec une vitesse très faible.

Dans le cas d'angle d'incidence nul, on aura un champ de vitesse presque symétrique par rapport à la corde joignant le bord d'attaque et le bord de fuite. Cela est dû à la caractéristique de symétrie du profil NACA 0015 utilisé. C'est le cas dans lequel l'extrados et l'intrados ont le comportement le plus similaire.



- Analyse de l'extrados du profil aérodynamique : Lorsque l'angle d'incidence est faible, les vitesses à l'extrados près du bord d'attaque sont plus élevées que  $V_\infty$ . Cette région diminuera au

fur et mesure l'angle d'incidence augmente. Par contre, les vitesses à l'extrados près du bord de fuite sont plus faibles que  $V_\infty$ , et la région avec ce comportement augmentera. Les vitesses au bord de fuite vont diminuer lorsque l'angle d'incidence augmente. Avec des angles d'incidences supérieures à  $45^\circ$ , on observe que presque tout l'extrados a une vitesse plus faible que  $V_\infty$ .

- Analyse de l'intrados du profil aérodynamique : Lorsque l'angle d'incidence est faible, les vitesses à l'intrados près du bord d'attaque sont plus faibles que  $V_\infty$ . Par contre, les vitesses à l'intrados près du bord de fuite sont supérieures à  $V_\infty$ .

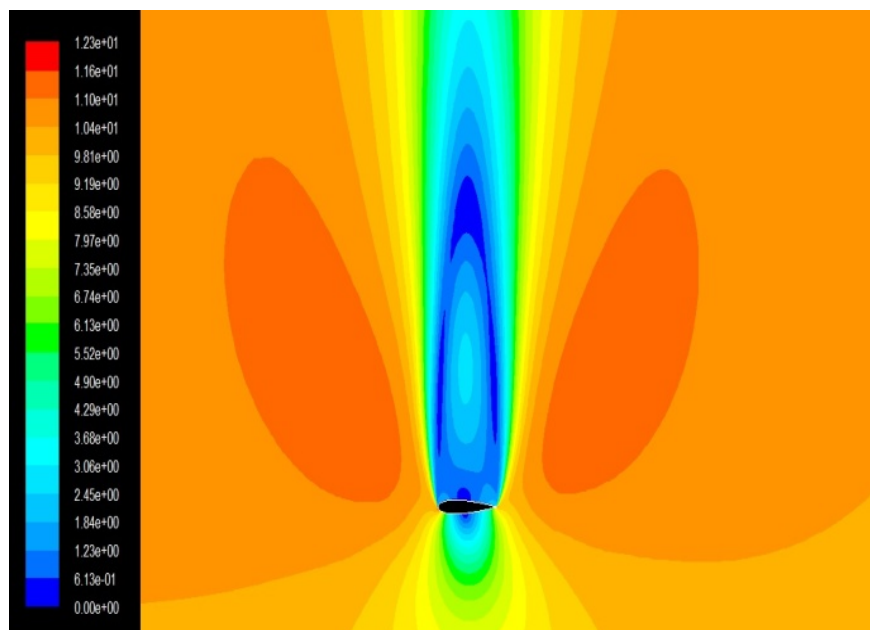
En conclusion, avec un angle d'incidence différent à zéro, si on divise le profil en quatre parties :

- 1 - bord d'attaque de l'extrados,
- 2 - bord d'attaque de l'intrados,
- 3 - bord de fuite de l'extrados
- 4 - bord de fuite de l'intrados

On peut observer que :

- la partie 1 du profil a la distribution de vitesses la plus élevée et la région 3 a la distribution de vitesses la plus faible
- l'augmentation de l'angle d'incidence est liée à une réduction de la région près du bord d'attaque, où la vitesse est très élevée.
- l'augmentation de l'angle d'incidence est liée à une augmentation de la région 3.

On peut également apercevoir qu'avec un angle d'incidence de  $90^\circ$ , la distribution de vitesse est presque symétrique par rapport à l'axe perpendiculaire à la corde, tel il y est représenté dans le graphique suivant :



Cette observation peut déterminer une vitesse de l'écoulement en aval du profil plus faible que celle à l'infini, en affectant donc aux autres éoliennes situées en aval.

En conclusion, le choix d'un bon emplacement de la pale par rapport à l'incidence du vent, est essentiel dans l'amélioration de la production d'énergie.

## CHAMPS DE VITESSE

Les résultats obtenus de la simulation en fonction de l'angle d'incidence de l'écoulement sont montrés à continuation.

### Angle d'incidence 0°

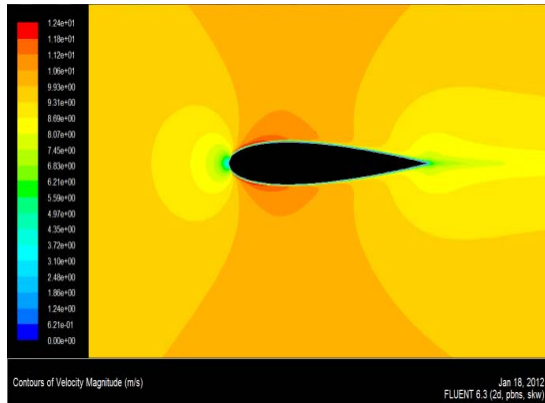


Figure 1 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 0°

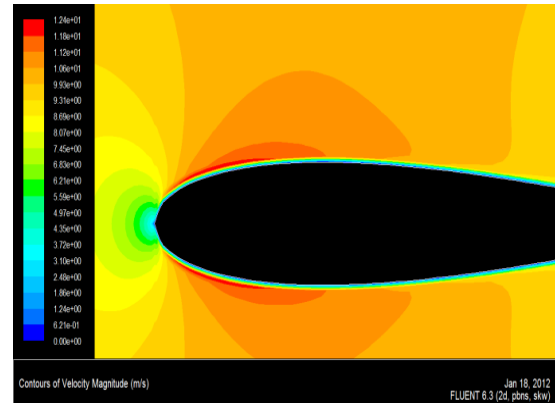


Figure 2 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'angle d'incidence égal à 0°

### Angle d'incidence 5.13°

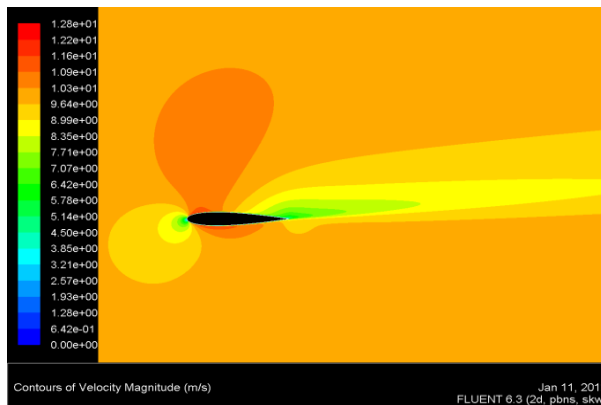


Figure 3 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 5.13°

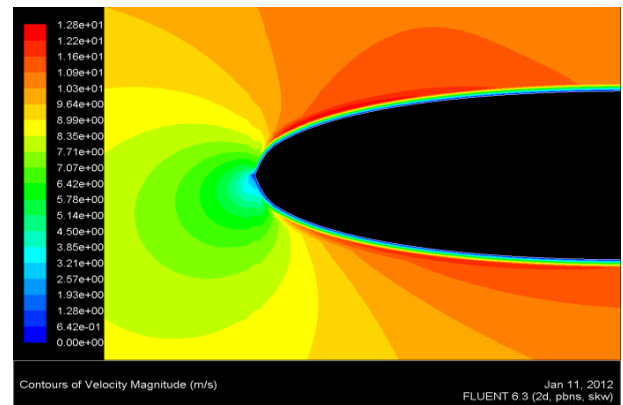


Figure 4 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'angle d'incidence égal à 5.13°

### Angle d'incidence 10.2°

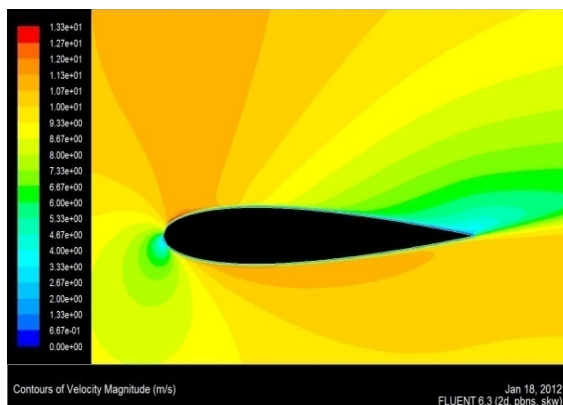


Figure 5 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 10.2°

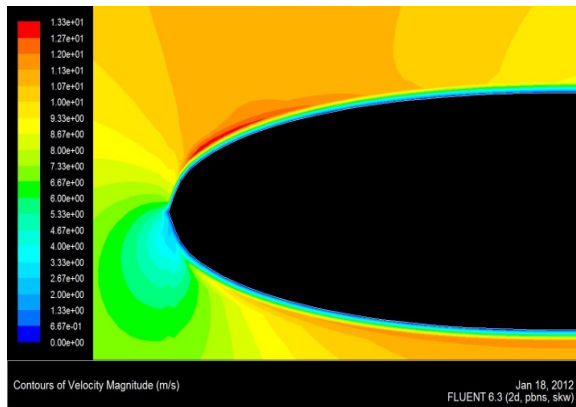


Figure 6 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'angle d'incidence égal à  $10.2^\circ$

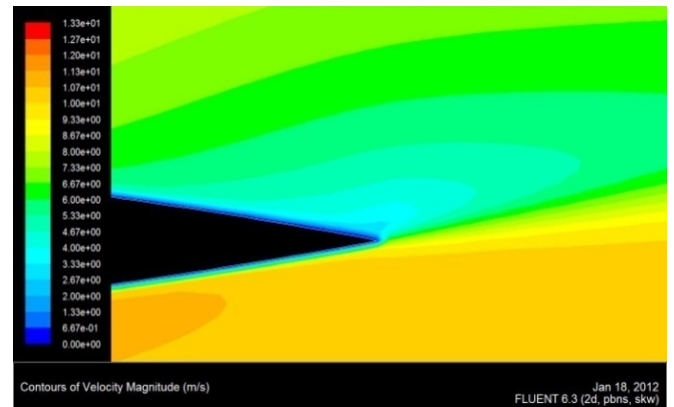


Figure 7 : Champ de vitesse en aval du profil avec l'angle d'incidence égal à  $10.2^\circ$

### Angle d'incidence $15.23^\circ$

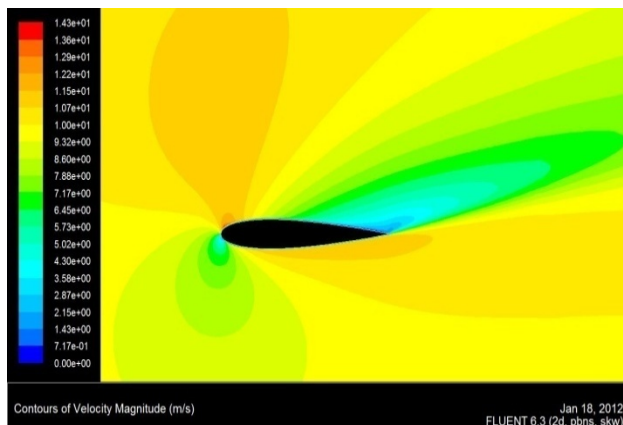


Figure 8 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à  $15.23^\circ$

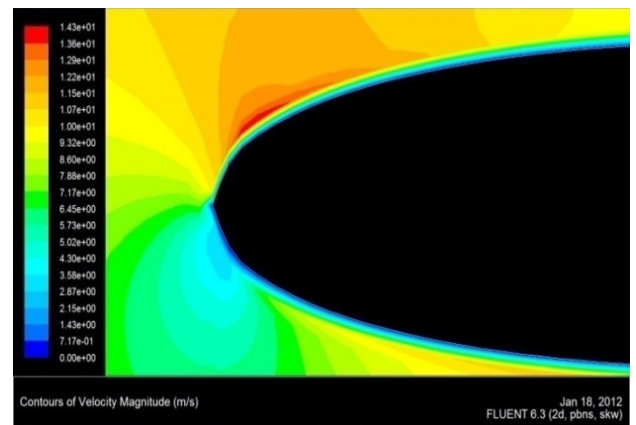


Figure 9 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'angle d'incidence égal à  $15.23^\circ$

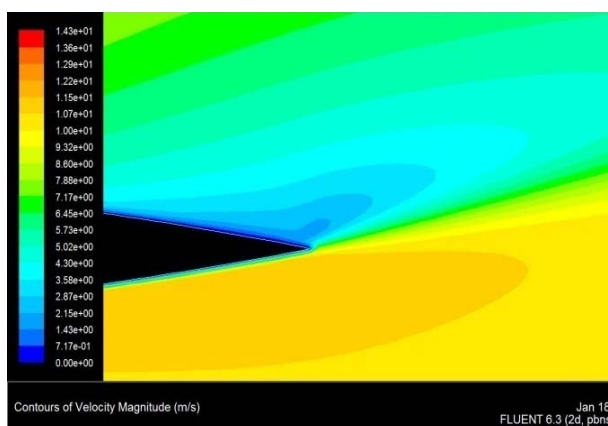
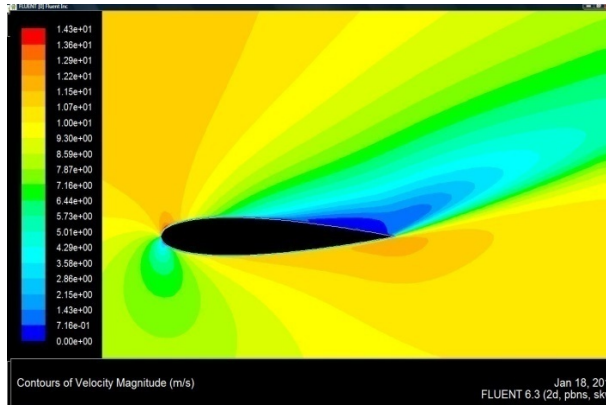
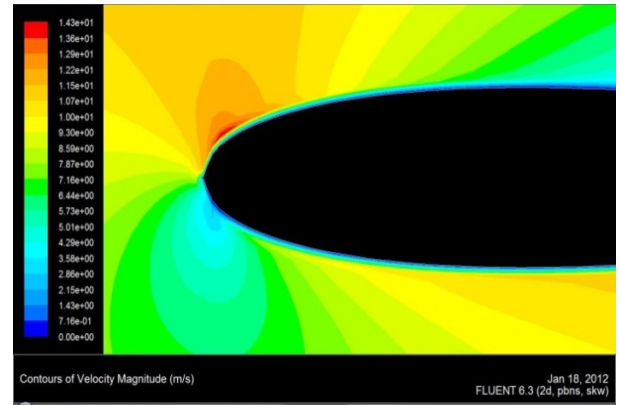


Figure 10 : Champ de vitesse en aval du profil avec l'angle d'incidence égal à  $15.23^\circ$

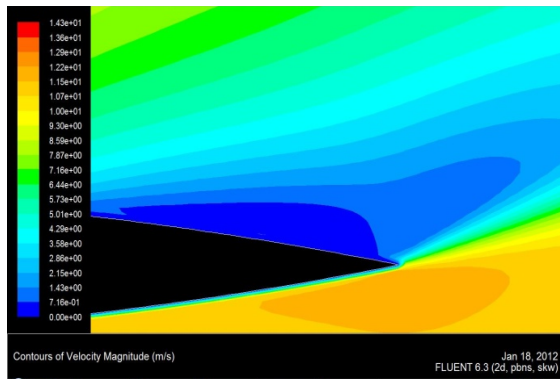
**Angle d'incidence 20.16°**



**Figure 11 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 20.16°**

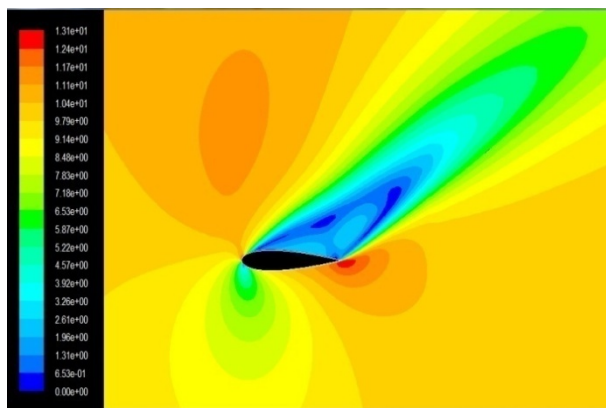


**Figure 12 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'angle d'incidence égal à 20.1**

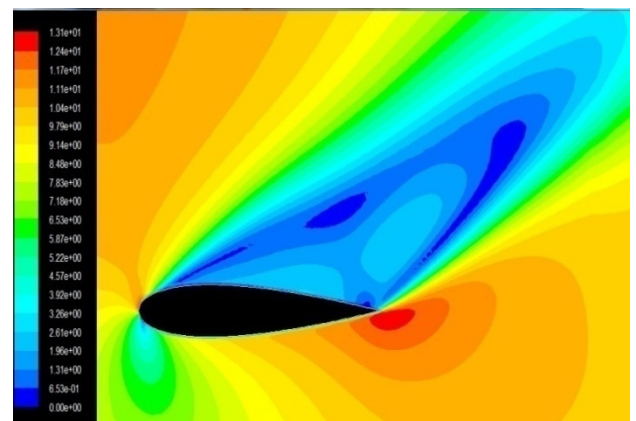


**Figure 13 : Champ de vitesse en aval du profil avec l'angle d'incidence égal à 20.16°**

**Angle d'incidence 30.2°**



**Figure 14 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 30.2°**



**Figure 15 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 30.2°**



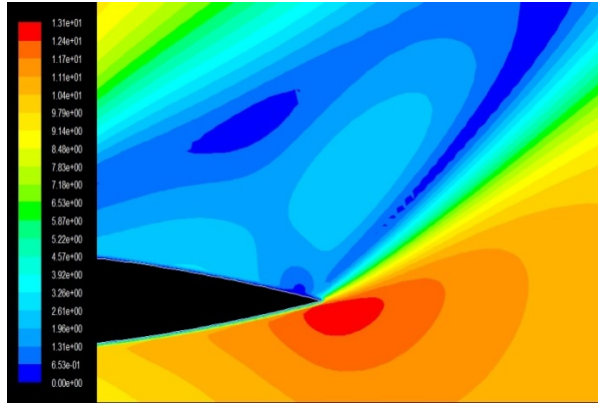


Figure 16 : Champ de vitesse en aval du profil avec l'angle d'incidence égal à 30.2°

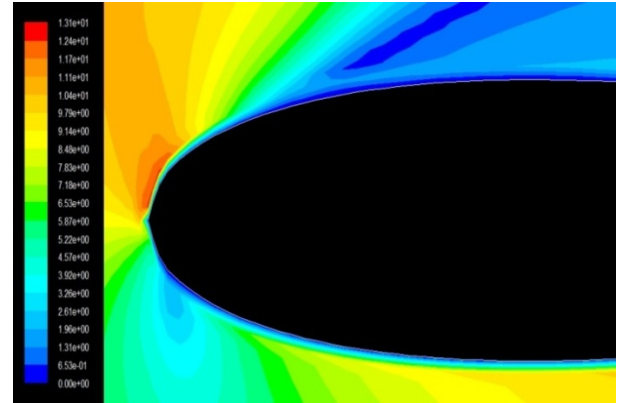


Figure 17 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'angle d'incidence égal à 30.2°

### Angle d'incidence 40°

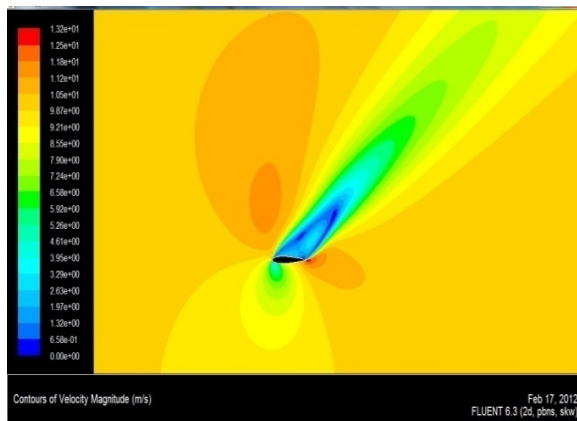


Figure 18 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 40°

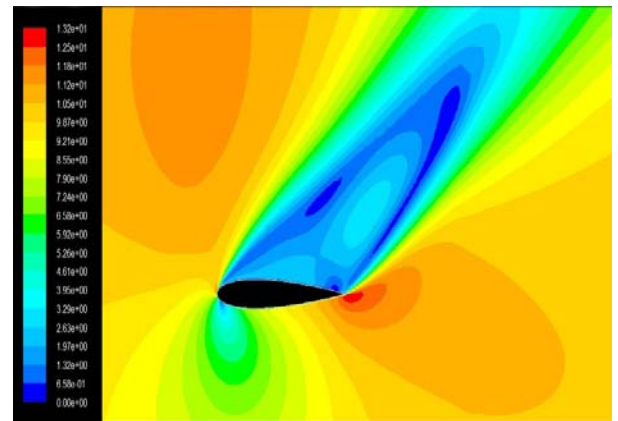


Figure 19 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 40°

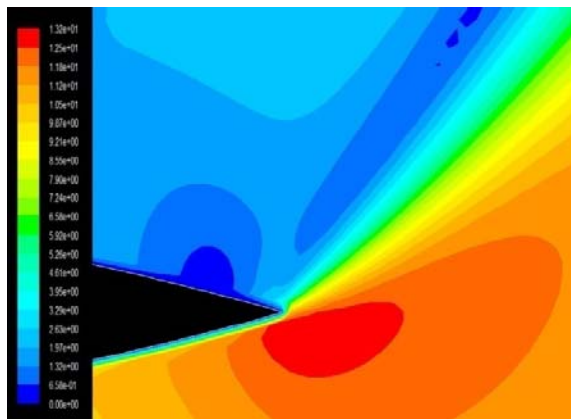


Figure 20 : Champ de vitesse en aval du profil avec l'angle d'incidence égal à 40°

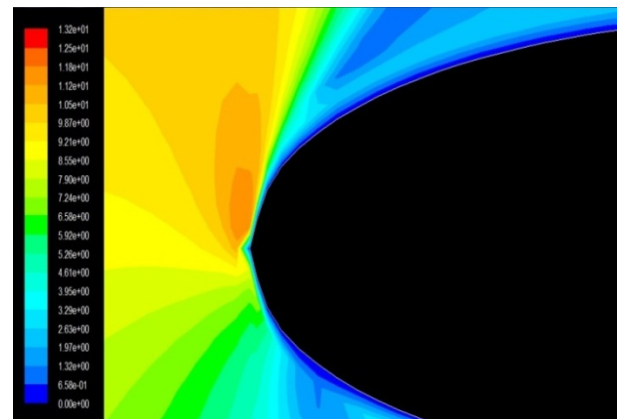


Figure 21 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'angle d'incidence égal à 40°

**Angle d'incidence 50°**

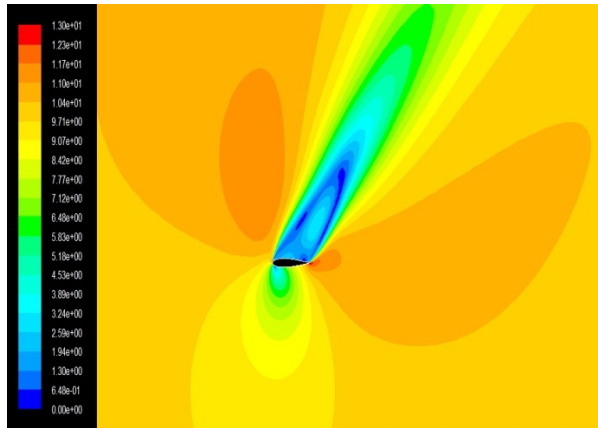


Figure 22 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 50°

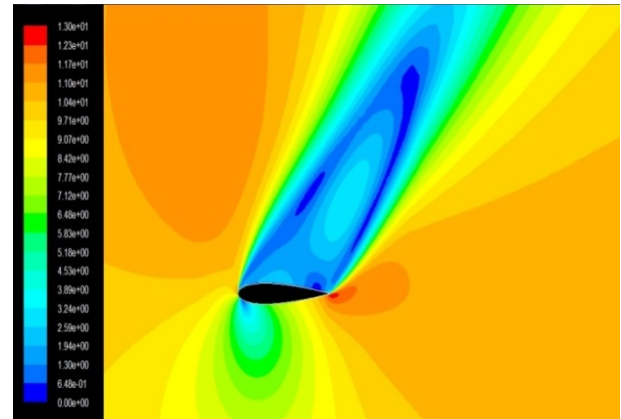


Figure 23 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 50°

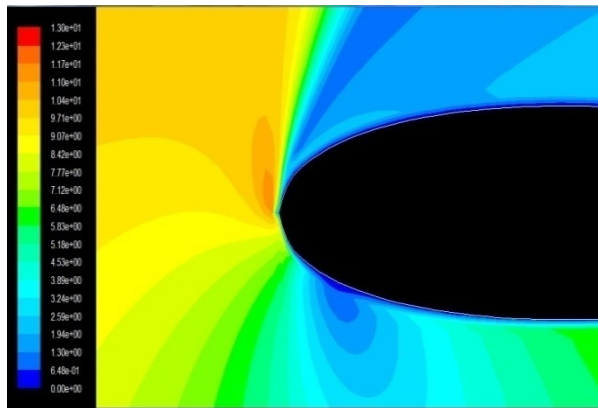


Figure 24 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'incidence égal à 50°

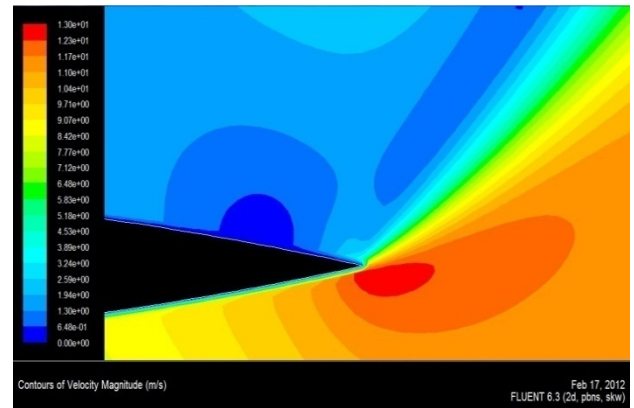


Figure 25 : Champ de vitesse en aval du profil avec l'angle d'incidence égal à 50°

**Angle d'incidence 70°**

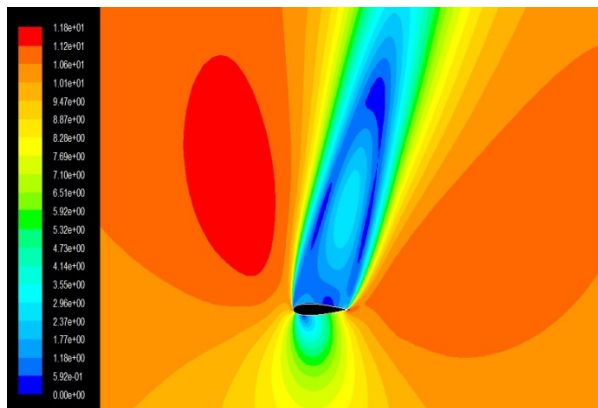


Figure 26 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 70°

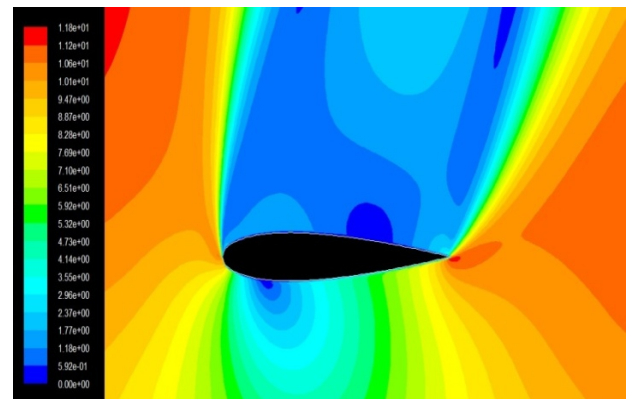


Figure 27 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à 70°

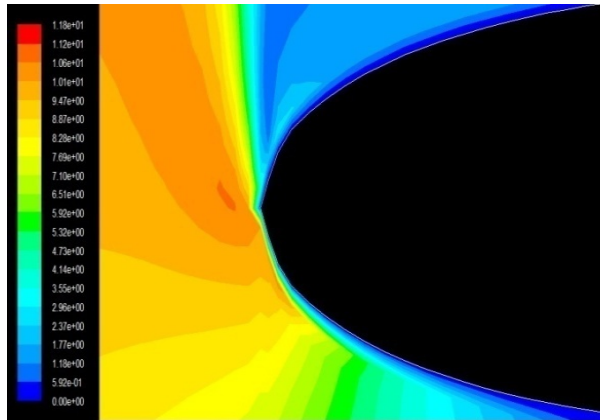


Figure 28 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'angle d'incidence égal à  $70^\circ$

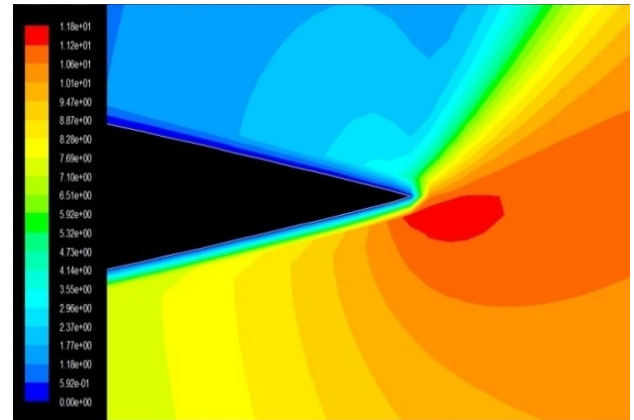


Figure 29 : Champ de vitesse en aval du profil avec l'angle d'incidence égal à  $70^\circ$

### Angle d'incidence $90^\circ$

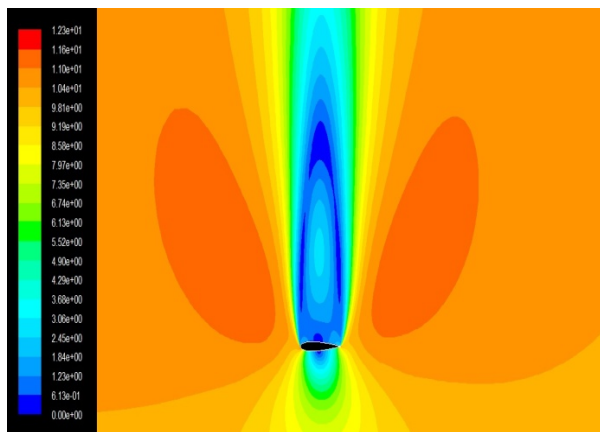


Figure 30 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à  $90^\circ$

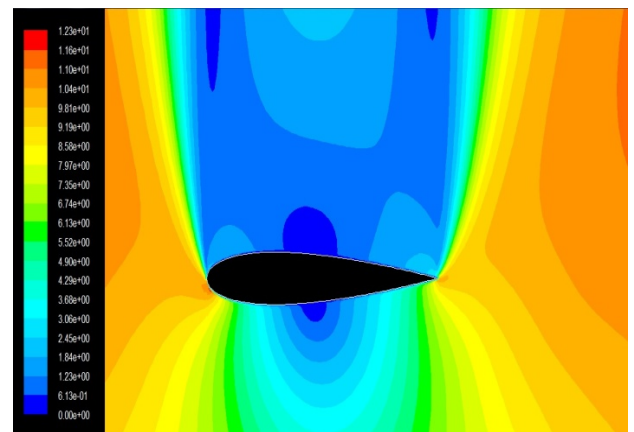


Figure 31 : Champ de vitesse autour du profil avec l'angle d'incidence égal à  $90^\circ$

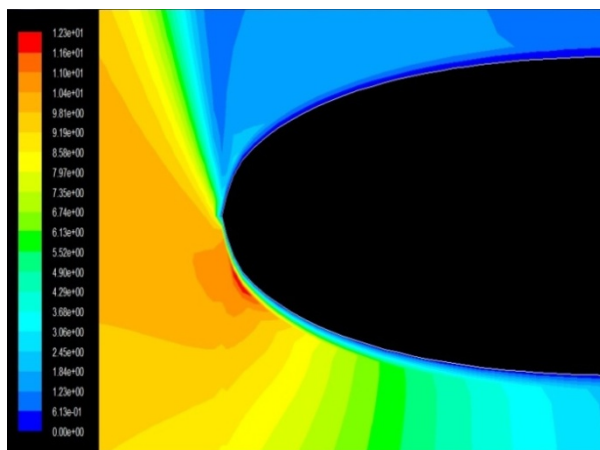


Figure 32 : Champ de vitesse en amont du profil avec l'angle d'incidence égal à  $90^\circ$

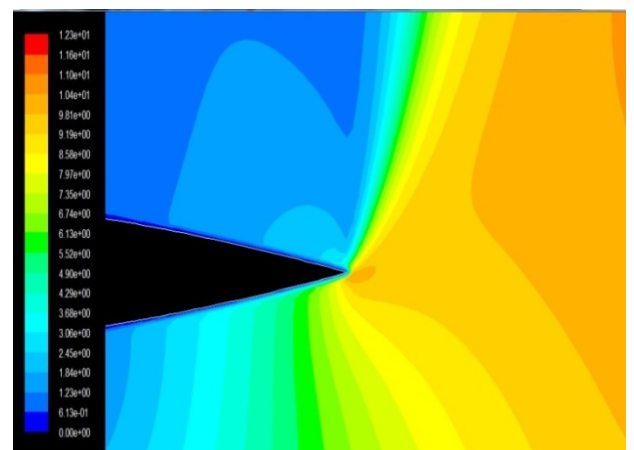


Figure 33 : Champ de vitesse en aval du profil avec l'angle d'incidence égal à  $90^\circ$



### 6.2.2. Comparaison des Champs de Pression en fonction de différents angles d'incidence

Typiquement, la pression à l'intrados d'un profil est supérieure à celle à son extrados. La distribution de pression est presque symétrique par rapport à la corde avec un angle d'incidence nul.

On peut observer qu'avec des angles d'incidence faibles, la pression à l'intrados, près du bord d'attaque, est plus haute que dans le bord de fuite. Cette région augmentera avec l'augmentation de l'angle d'incidence. Avec des angles d'incidences supérieures, la différence de pression entre l'intrados et l'extrados augmente ; il y a donc, plus de portance. Cette observation est plus facile d'apercevoir avec les figures qui représentent « static pressure vs x/c » parce que la séparation entre les courbes correspondant à l'intrados et l'extrados, augmente avec l'augmentation de l'angle d'incidence.

La portance est très faible avec un angle d'incidence  $\alpha = 0^\circ$  parce que la différence de pression entre l'intrados et l'extrados est minimale. Par contre, avec  $\alpha = 90^\circ$ , on a une séparation entre les deux courbes presque constante et la portance est supérieure.

Il faut trouver un équilibre entre la vitesse du vent à l'infini amont et l'angle d'incidence pour obtenir une amélioration de la production éolienne.

#### CHAMPS DE PRESSION

Les résultats obtenus de la simulation en fonction de l'angle d'incidence de l'écoulement sont montrés à continuation.

#### Angle d'incidence $0^\circ$

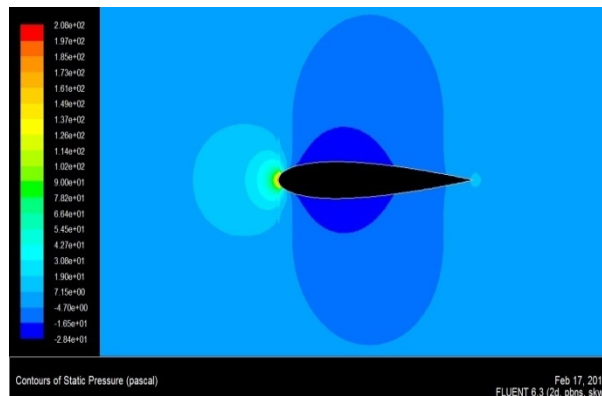


Figure 34 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence  $0^\circ$

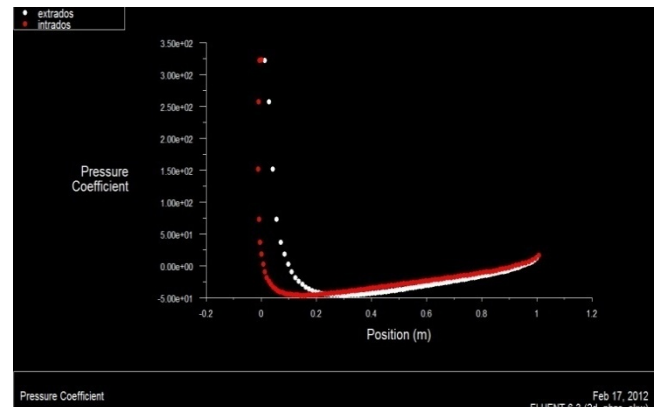
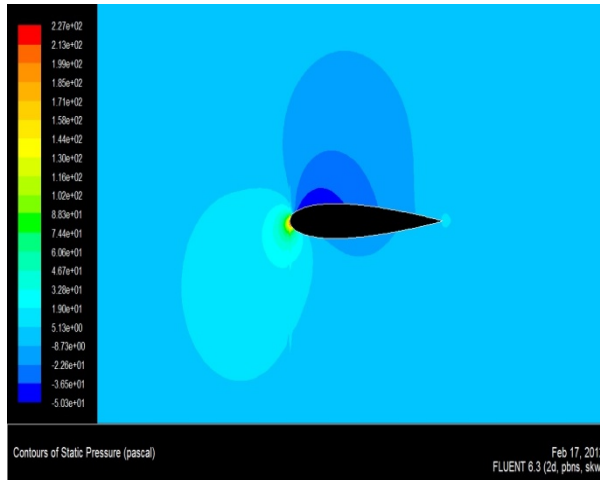
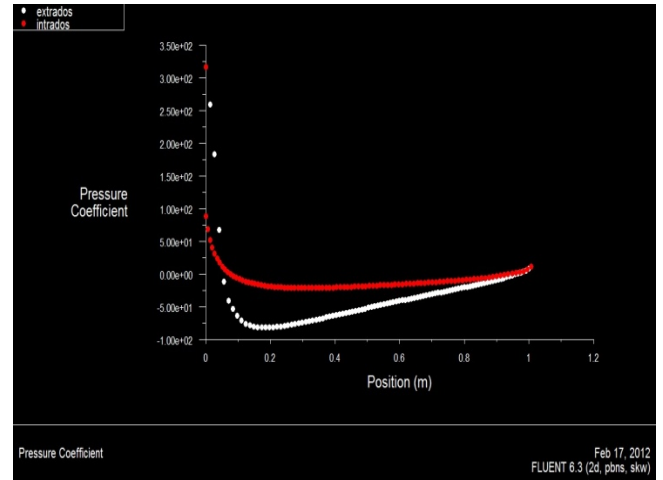


Figure 35 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur x/c

**Angle d'incidence 5.13°**

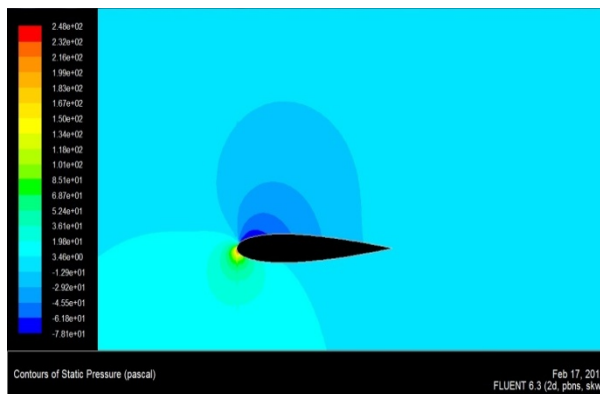


**Figure 36 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence 5.13°**

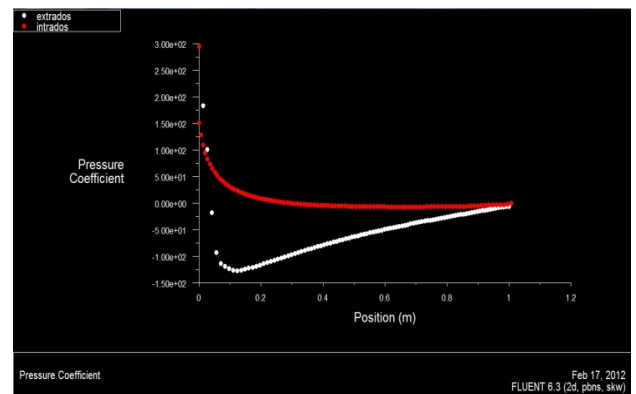


**Figure 37 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur x/c**

**Angle d'incidence 10.2°**

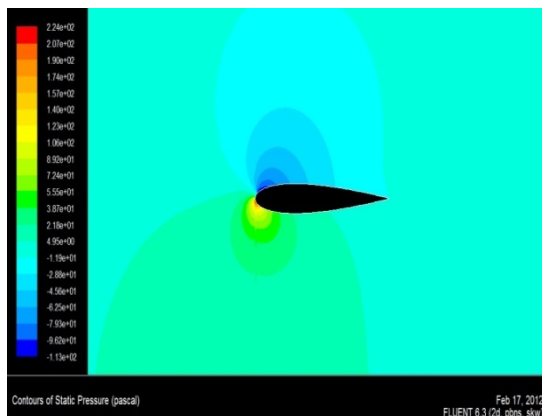


**Figure 38 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence 10.2°**

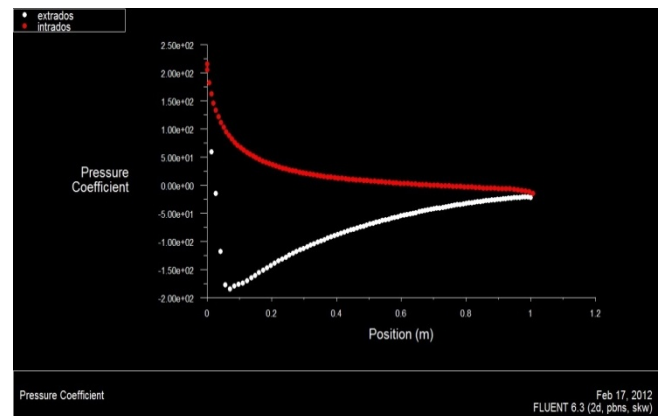


**Figure 39 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur x/c**

**Angle d'incidence 15.23°**

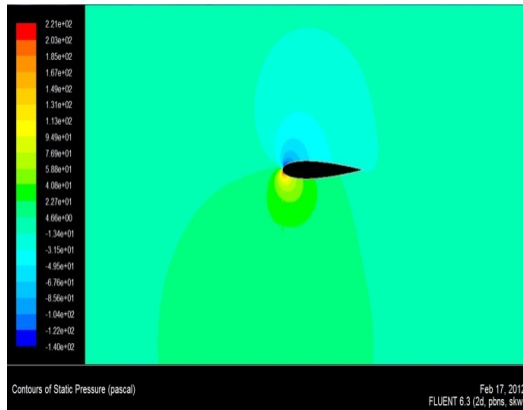


**Figure 40 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence 15.23°**

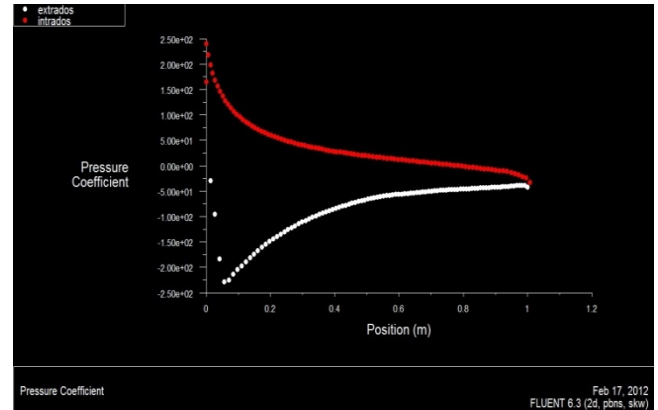


**Figure 41 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur x/c**

**Angle d'incidence 20.16°**

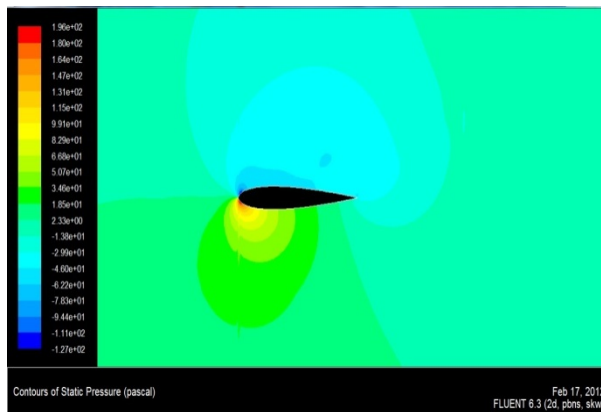


**Figure 42 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence 20.16°**

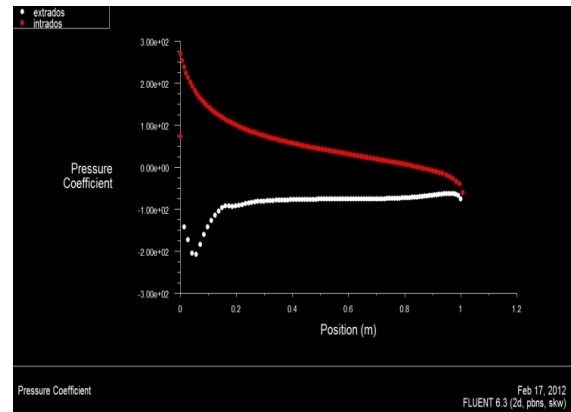


**Figure 43 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur x/c**

**Angle d'incidence 30.2°**

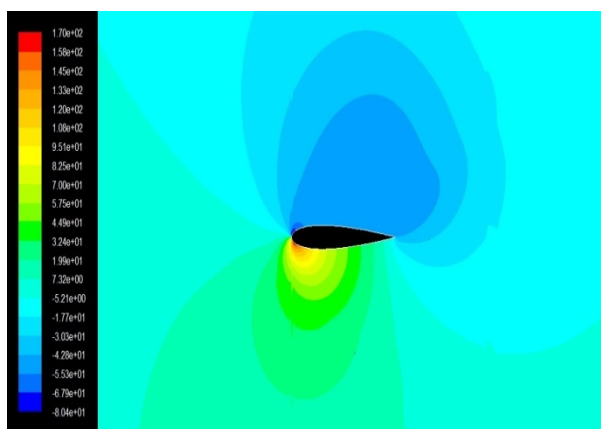


**Figure 44 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence 30.2°**

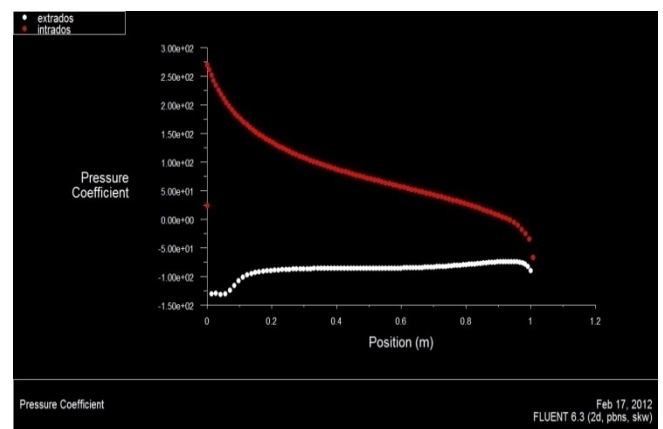


**Figure 45 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur x/c**

**Angle d'incidence 40°**

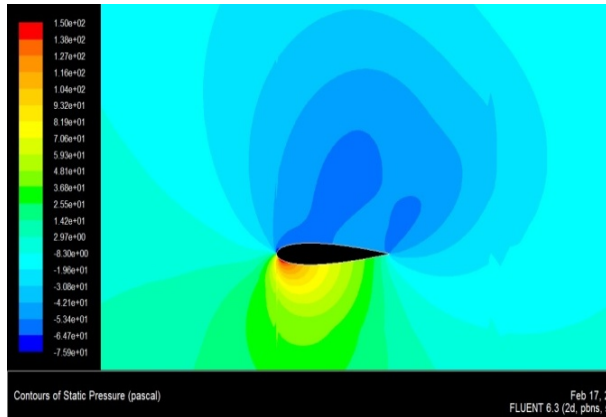


**Figure 46 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence 40°**

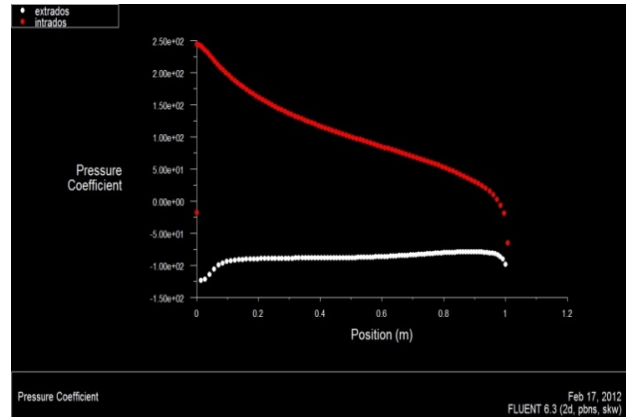


**Figure 47 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur x/c**

**Angle d'incidence 50°**

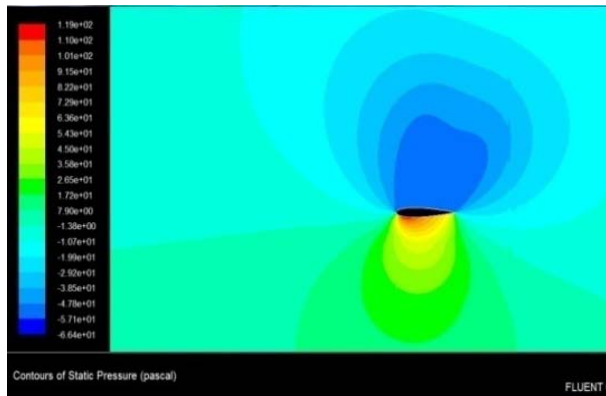


**Figure 48 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence 50°**

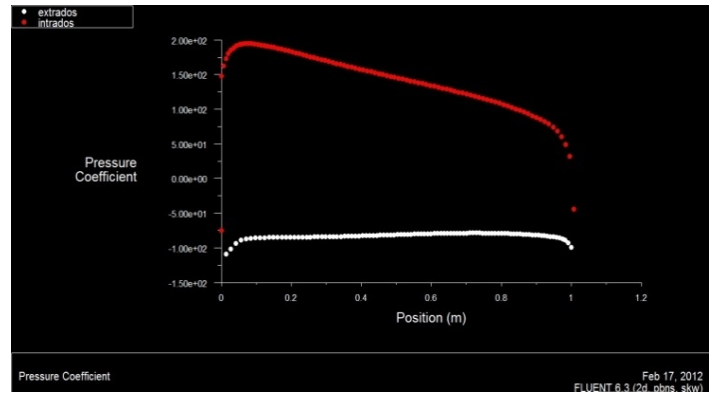


**Figure 49 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur  $x/c$**

**Angle d'incidence 70°**

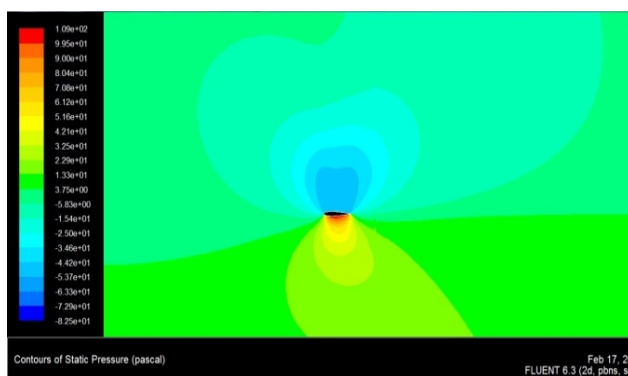


**Figure 50 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence 70°**

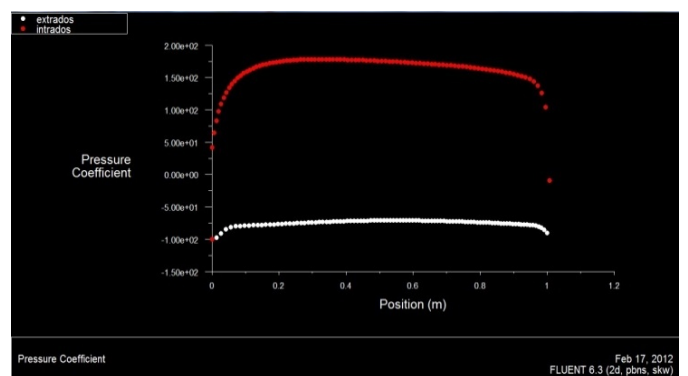


**Figure 51 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur  $x/c$**

**Angle d'incidence 90°**



**Figure 52 : Champ de pression autour du profil à l'angle d'incidence 70°**



**Figure 53 : Valeur du Coefficient de pression par rapport à la valeur  $x/c$**

### 6.3. Troisième expérience : Comparaison des coefficients de pression

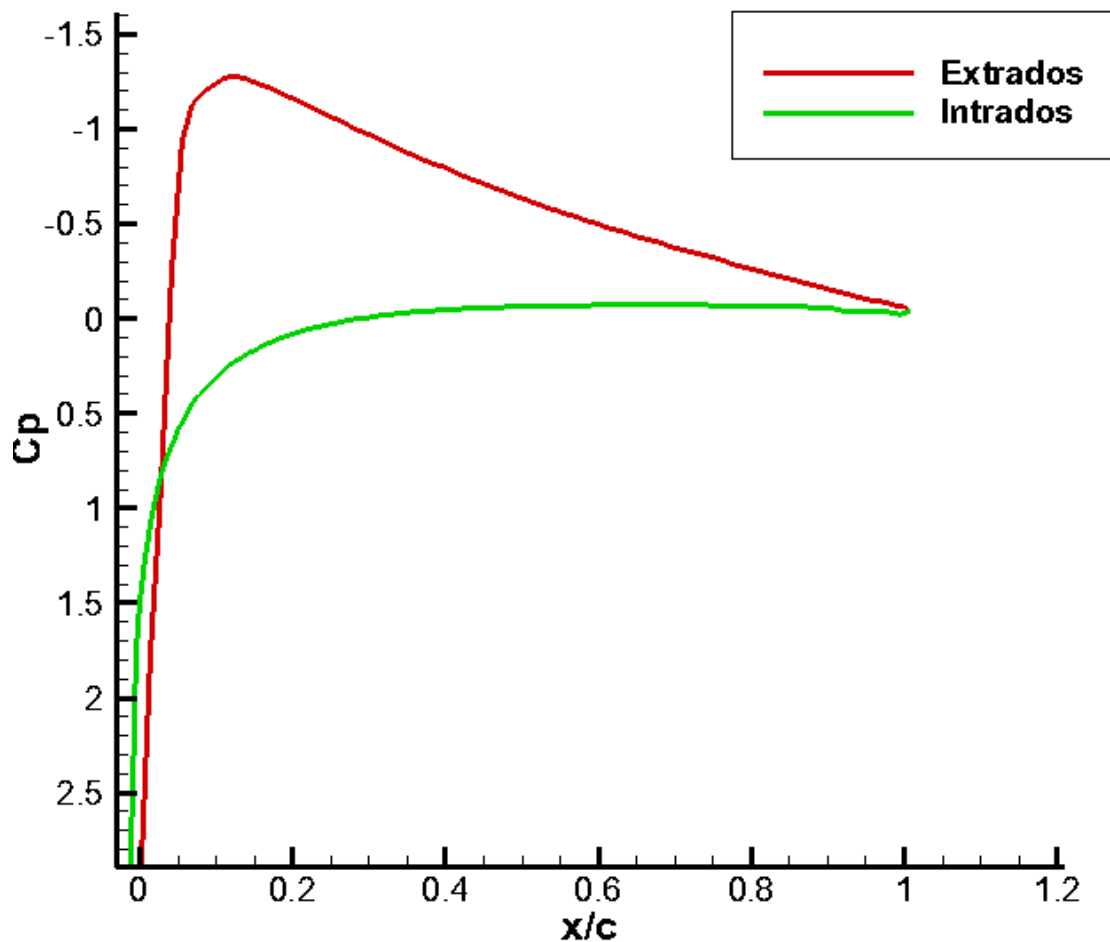
La troisième expérience visait l'exportation des valeurs de la pression statique à partir de la simulation de FLUENT, permettant de les comparer avec des expérimentations déjà faites en laboratoires ou souffleries.

Le coefficient de pression  $C_p$  par rapport à les valeurs de  $x/c$  peut être calculé par :

$$C_p = \frac{\text{Pression statique}}{\text{Pression dynamique}} = \frac{p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2}$$

La simulation a été faite avec les mêmes données utilisées en soufflerie: le même profil, la même vitesse du vent à l'infini amont (ce qui veut dire le même nombre de Reynolds) et le même angle d'incidence.

Le résultat de l'exportation des valeurs de pression statique de la simulation du profil NACA 0015 avec un angle d'incidence de  $10^\circ$  est :



Les différences obtenues par la comparaison des résultats de la simulation et les expérimentaux nous amènent à une certaine imprécision des résultats.

#### 6.4. Quatrième expérience : Validation du Modèle de Plaque

Cette dernière expérience poursuit la comparaison des valeurs et de l'allure des courbes obtenues à partir de la simulation numérique FLUENT et des calculs expérimentaux.

Le but de l'expérience sera d'obtenir des distributions de pression et de vitesse potentiellement utilisables dans un modèle hybride afin de représenter un vrai profil aérodynamique. Pour cela, on va à déterminer le niveau de similitude des distributions de vitesse et de pression obtenues avec un profil aérodynamique et celles d'une plaque.

La procédure suivie pour réaliser cette expérience a été la suivante:

- a) La simulation du profil aérodynamique NACA 0015 m'a permis d'obtenir les valeurs de pression statique dans son intrados et son extrados selon les valeurs  $x/c$ .

Cependant, étant donné que les valeurs  $x/c$  de l'intrados et de l'extrados du profil sont différentes, il a été nécessaire de réaliser des interpolations me permettant d'avoir les mêmes points de calcul de  $x/c$  à l'intrados qu'à l'extrados.

La liste de valeurs suivante montre, en tant qu'exemple, les valeurs de pression pour un angle d'incidence de  $15.23^\circ$  après interpolation.

(title "Static Pressure") (xy/key/label "intrados")		(title "Static Pressure") (xy/key/label "extrados")	
1.008	-10.668	0	135.057
0.995841	-6.97832	0.0134076	34.1005
0.983781	-6.63612	0.0273886	-15.0173
0.971811	-5.88473	0.0419625	-75.0678
0.959904	-5.05196	0.0563149	-108.659
0.948033	-4.37663	0.0703407	-113.048
0.936167	-3.98668	0.0840944	-109.988
0.924293	-3.82469	0.0975538	-108.245
0.912418	-3.77202	0.110722	-106.811
0.900545	-3.74733	0.123632	-104.374
0.888684	-3.68767	0.136325	-101.279
0.876839	-3.56289	0.148826	-98.2015
0.865015	-3.3849	0.161151	-95.3454
0.85321	-3.17589	0.173313	-92.665
0.841424	-2.94765	0.185321	-90.1035
0.829657	-2.70713	0.197184	-87.6181
0.817908	-2.45904	0.208911	-85.1958
0.806176	-2.20732	0.220515	-82.8522
0.794459	-1.95605	0.232001	-80.6105
0.782756	-1.71033	0.243378	-78.4704
0.771068	-1.47534	0.25465	-76.4124
0.759393	-1.25161	0.265823	-74.4246
0.747732	-1.03485	0.276902	-72.5084
0.736084	-0.82104	0.287893	-70.6687
0.724451	-0.607852	0.298799	-68.9

0.712831	-0.393807	0.309623	-67.1907
0.701227	-0.177758	0.320368	-65.5329
0.689637	0.0411892	0.331038	-63.9232
0.678062	0.263735	0.341635	-62.36
0.666503	0.490566	0.352163	-60.8413
0.65496	0.722254	0.362625	-59.3651
0.643433	0.959202	0.373023	-57.9313
0.631922	1.2016	0.383362	-56.5414
0.620429	1.44964	0.393642	-55.1955
0.608952	1.70355	0.403868	-53.8899
0.597493	1.96345	0.414039	-52.6201
0.586052	2.22942	0.424156	-51.3834
0.574629	2.5014	0.434223	-50.1779
0.563224	2.77891	0.444239	-49.0023
0.551838	3.06118	0.454209	-47.8555
0.540471	3.34803	0.464133	-46.7369
0.529124	3.64088	0.474013	-45.6463
0.517796	3.9418	0.483852	-44.5837
0.50649	4.25219	0.493648	-43.5482
0.495205	4.57312	0.503405	-42.5384
0.483943	4.9054	0.513123	-41.5529
0.472703	5.24961	0.522804	-40.5905
0.461487	5.60601	0.532448	-39.6505
0.450296	5.97427	0.542058	-38.7324
0.439129	6.35379	0.551633	-37.8357
0.427988	6.74551	0.561176	-36.96
0.416875	7.1525	0.570688	-36.1051
0.405789	7.57811	0.580169	-35.2706
0.394732	8.02476	0.589621	-34.4558
0.383706	8.49428	0.599044	-33.6598
0.372712	8.98836	0.608438	-32.8821
0.361751	9.50839	0.617805	-32.1221
0.350824	10.0552	0.627146	-31.3792
0.339933	10.6289	0.63646	-30.653
0.329078	11.2299	0.645749	-29.9431
0.318263	11.8611	0.655013	-29.2494
0.307487	12.5279	0.664254	-28.5716
0.296754	13.2352	0.673471	-27.9096
0.286066	13.9864	0.682664	-27.2627
0.275424	14.7849	0.691835	-26.6306
0.264831	15.6335	0.700983	-26.0126
0.254288	16.5348	0.710109	-25.4086
0.243797	17.4894	0.719213	-24.8183
0.233362	18.4967	0.728295	-24.2414
0.222985	19.5591	0.737355	-23.6777
0.212667	20.6879	0.746395	-23.1272
0.202414	21.897	0.755414	-22.5896
0.192228	23.1969	0.764412	-22.0649
0.182114	24.5959	0.773391	-21.553

0.172076	26.1026	0.78235	-21.054
0.16212	27.7279	0.791289	-20.5677
0.152249	29.4814	0.80021	-20.0941
0.142469	31.3684	0.809112	-19.6333
0.132785	33.3936	0.817996	-19.1853
0.123202	35.5751	0.826862	-18.7501
0.113728	37.9479	0.835711	-18.3277
0.104372	40.5448	0.844542	-17.9182
0.0951439	43.3857	0.853355	-17.5214
0.0860544	46.49	0.862147	-17.1368
0.0771118	49.9078	0.870917	-16.7643
0.0683341	53.7217	0.879666	-16.4034
0.05974	58.0094	0.888391	-16.054
0.0513498	62.8295	0.897091	-15.7162
0.0431846	68.2401	0.905766	-15.3898
0.0352673	74.3354	0.914412	-15.075
0.0276325	81.2652	0.923031	-14.7718
0.0203205	89.3476	0.931626	-14.4809
0.0133986	99.146	0.940207	-14.2047
0.00698411	111.108	0.948783	-13.9361
0.00120682	125.332	0.957364	-13.6568
-0.00382926	142.646	0.965956	-13.3701
-0.00805015	166.196	0.974538	-13.1117
-0.010903	196.755	0.98307	-12.9369
-0.0102018	221.001	0.991515	-12.9628
-0.00589668	224.076	0.999831	-13.6931
0	135.057	1.008	-10.668
)		)	

- b) On calcule ensuite le delta de pression  $\Delta P$  entre l'intrados et l'extrados pour chaque valeur de  $x/c$ , avec l'aide d'un logiciel élaboré au laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ENSAM:

$$\Delta P = P_{Intrados} - P_{extrados}$$

La liste suivante montre les valeurs de  $\Delta P$  obtenus par rapport aux valeurs de  $x/c$ , pour un angle d'incidence  $15.23^\circ$  :

#### VALEURS DE Delta P

$x/c$	Delta P
0.000000	0.000000
0.008400	-64.082679
0.016800	-71.124897
0.025200	-90.066555
0.033600	-117.127359
0.042000	-144.295067
0.050400	-162.677111
0.058800	-169.451080



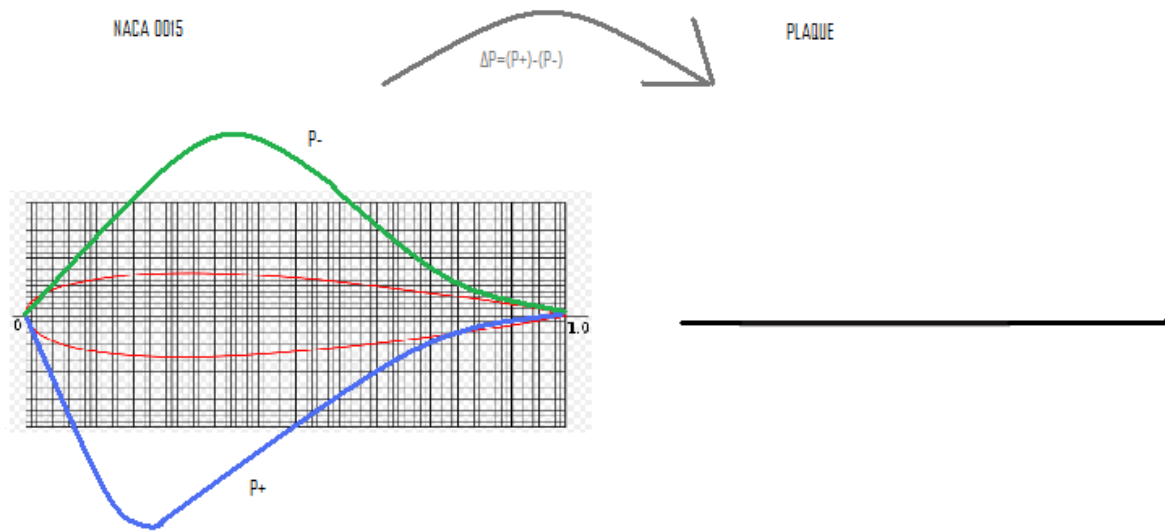
0.067200	-167.661084
0.075600	-162.402525
0.084000	-157.244621
0.092400	-153.046347
0.100800	-149.562962
0.109200	-146.196305
0.117600	-142.595765
0.126000	-138.743296
0.134400	-134.806700
0.142800	-130.966170
0.151200	-127.314072
0.159600	-123.857451
0.168000	-120.574365
0.176400	-117.438371
0.184800	-114.426705
0.193200	-111.517399
0.201600	-108.698458
0.210000	-105.966607
0.218400	-103.324851
0.226800	-100.775875
0.235200	-98.316260
0.243600	-95.937208
0.252000	-93.629453
0.260400	-91.388208
0.268800	-89.212970
0.277200	-87.105681
0.285600	-85.067745
0.294000	-83.096069
0.302400	-81.184181
0.310800	-79.325776
0.319200	-77.516301
0.327600	-75.752063
0.336000	-74.030042
0.344400	-72.347998
0.352800	-70.704669
0.361200	-69.099511
0.369600	-67.532622
0.378000	-66.005015
0.386400	-64.517192
0.394800	-63.068006
0.403200	-61.654887
0.411600	-60.274527
0.420000	-58.924515
0.428400	-57.602962
0.436800	-56.307695
0.445200	-55.036710
0.453600	-53.789164
0.462000	-52.564820
0.470400	-51.364126
0.478800	-50.187713
0.487200	-49.035348
0.495600	-47.906173
0.504000	-46.799501
0.512400	-45.714157
0.520800	-44.649235

0.529200	-43.603888
0.537600	-42.577440
0.546000	-41.568872
0.554400	-40.577174
0.562800	-39.602108
0.571200	-38.643828
0.579600	-37.702461
0.588000	-36.778027
0.596400	-35.870114
0.604800	-34.978393
0.613200	-34.102656
0.621600	-33.242584
0.630000	-32.397799
0.638400	-31.568015
0.646800	-30.753083
0.655200	-29.952924
0.663600	-29.167429
0.672000	-28.396419
0.680400	-27.639215
0.688800	-26.895498
0.697200	-26.164580
0.705600	-25.445958
0.714000	-24.739401
0.722400	-24.044318
0.730800	-23.360098
0.739200	-22.686250
0.747600	-22.022287
0.756000	-21.367015
0.764400	-20.719150
0.772800	-20.076921
0.781200	-19.439032
0.789600	-18.805650
0.798000	-18.178627
0.806400	-17.560289
0.814800	-16.952511
0.823200	-16.356900
0.831600	-15.774934
0.840000	-15.208201
0.848400	-14.658417
0.856800	-14.127479
0.865200	-13.617901
0.873600	-13.134091
0.882000	-12.683712
0.890400	-12.274912
0.898800	-11.909100
0.907200	-11.574970
0.915600	-11.252041
0.924000	-10.915889
0.932400	-10.538916
0.940800	-10.080570
0.949200	-9.491578
0.957600	-8.745926
0.966000	-7.897614
0.974400	-7.048947
0.982800	-6.353587

0.991200 -6.071021  
0.999600 -6.461216  
1.008000 0.000000

- c) Cet ensemble de valeurs de  $\Delta P$  par rapport à  $x/c$  m'a servi pour déterminer le comportement d'un modèle hybride, par exemple, une plaque.

On pourra ainsi valider le modèle hybride en comparant la similitude existante entre le champ de vitesse obtenu avec le profil aérodynamique NACA 0015 et le champ de vitesse obtenu avec le modèle hybride.



Les UDF's (User Defined Functions) de FLUENT nous aideront à réaliser cette expérience de compilation des programmes en C++.

Sur la base du code en C++ détaillé en Annexes, j'ai pu appliquer les valeurs de  $\Delta P$  dans la plaque.

Tout d'abord, j'ai défini le volume de control dans le logiciel GAMBIT. Pour simplifier, j'ai pris l'hypothèse d'un même volume de control que celui utilisé dans le profil NACA 0015.

J'ai également défini les conditions aux limites de manière générale pour tous les cas:

<b>Limite du VF</b>	Inlet (E-D-F)	Outlet (H-G-I)	Plaque	Top	Botton
<b>Condition aux limites</b>	Velocity inlet	Pressure outlet	Wall	Velocity inlet	Velocity inlet

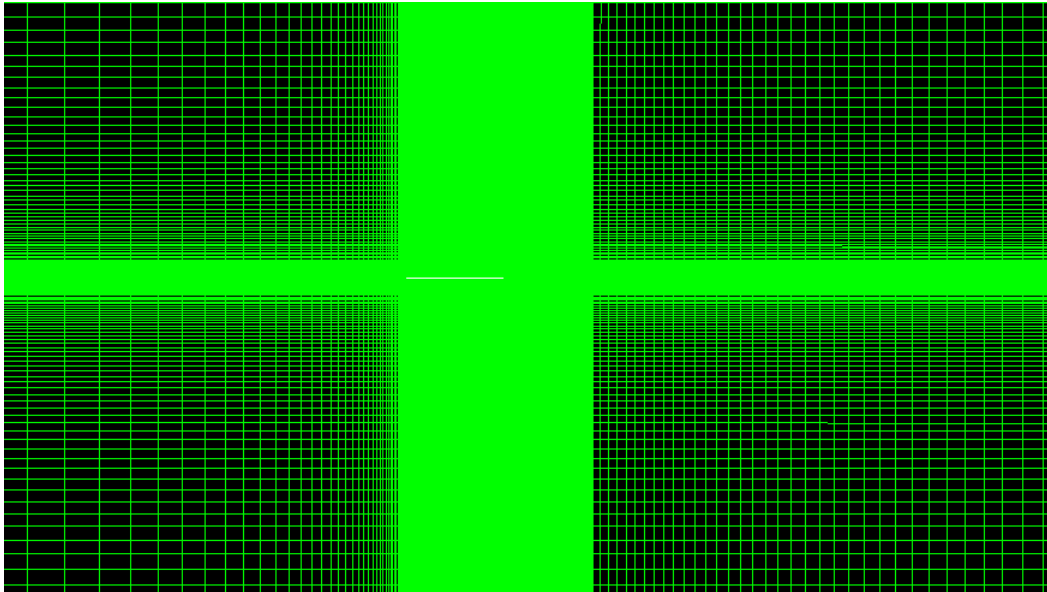
<b>Limite du VF</b>	S1	S2	S3	S4	S5
<b>Condition aux limites</b>	Interior	Interior	Interior	Interior	Interior

<b>Limite du VF</b>	S6	S7	S8	S9	S10
<b>Condition aux limites</b>	Interior	Interior	Interior	Interior	Interior

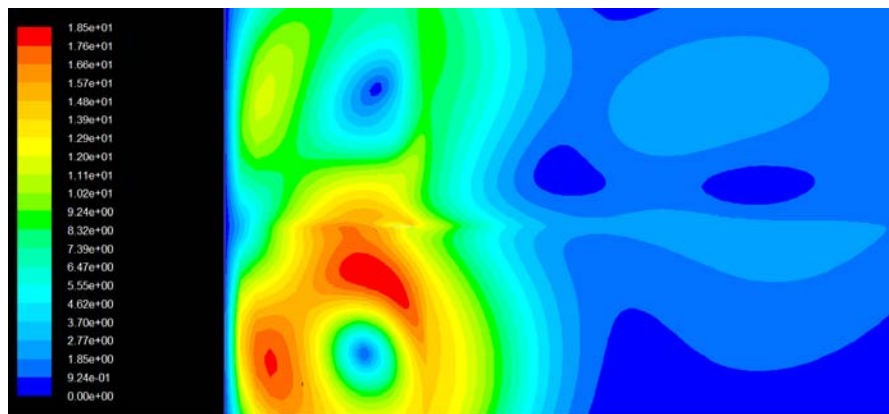
La seule différence notable avec le cas du profil aérodynamique réel est la substitution de la surface de l'extrados et l'intrados par la surface de la plaque.

La figure ci-dessous nous montre le maillage utilisé dans la simulation à l'aide du logiciel FLUENT. Il est très similaire à celui qu'on a utilisé dans le cas du profil aérodynamique NACA 0015.

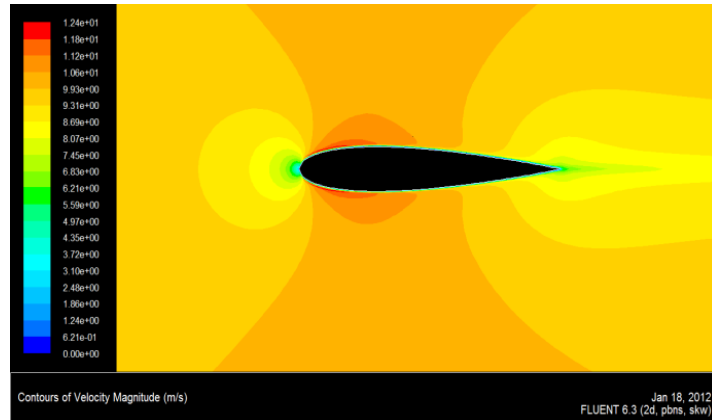


La distribution du champ de vitesse obtenue de la simulation en cas d'angle d'incidence nul ne donne pas un résultat très cohérent. On observe des différences majeures entre les valeurs obtenues avec le profil aérodynamique et celles obtenues avec la plaque ; ce que nous permet de conclure que ces distributions de pression et de vitesse ne sont pas utilisables dans un modèle hybride afin de représenter un vrai profil aérodynamique.

Distribution du champ de vitesse de la plaque :

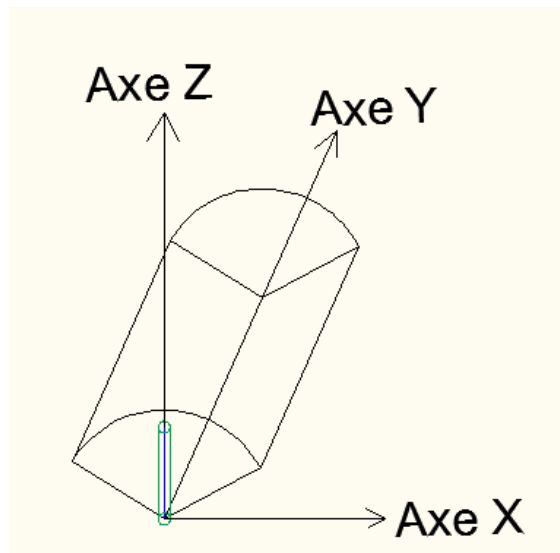


Distribution du champ de vitesse du profil aérodynamique :

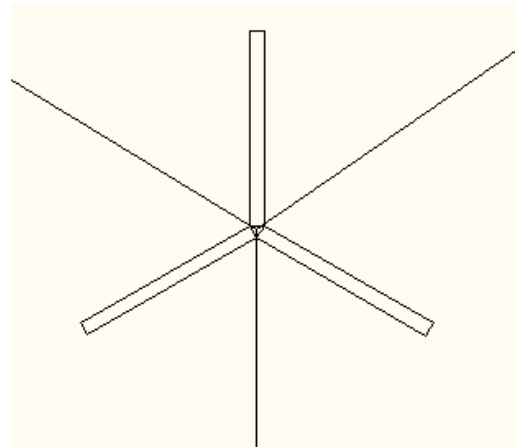


### 6.5. Dernière expérience : Programmation en C++

Finalement, j'ai centré mon travail dans la réalisation d'un programme en langage C++. Le programme déterminera la distance entre un point donné par Fluent en 3D [x, y, z] et la ligne active qui représente la pale de l'éolien. On peut noter dans la figure ci-dessous que la ligne active est la ligne bleue qui coïncide avec l'axe Z.



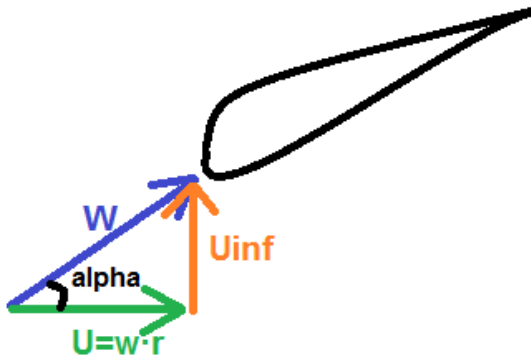
Afin de simplifier le calcul et de représenter l'éolien tripale, un secteur de cylindre de 120° a été utilisé.



Si la distance calculée est inférieure à la valeur déterminée par le "radius" (c'est à dire, si la ligne est dans le cylindre de rayon égal au radius, et sa longueur est égale à la hauteur de la ligne active), on fera des calculs afin de déterminer les efforts volumétriques.

La vitesse incident dans le profil est la vitesse relative (W) est défini par:

$$W = \sqrt{U^2 + U_\infty^2} = \sqrt{(\omega \cdot r)^2 + U_\infty^2}$$



La valeur de  $U_{\infty}$  définie directement, est de 10 m/s. La vitesse de rotation est égale à  $\omega = 60$  rad/s. La ligne active va roter autour de l'axe Z. Les autres données importants sont :

- La longueur de la ligne active = 1
- La corde du profil de  $c = 0,1$  m
- Le radius  $R = 0,125$  m

L'angle alpha est défini par l'expression suivante:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\omega \cdot r}{W}$$

Le volume différentiel de la ligne active est défini par:

$$dV = \pi \cdot R^2 \cdot dr$$



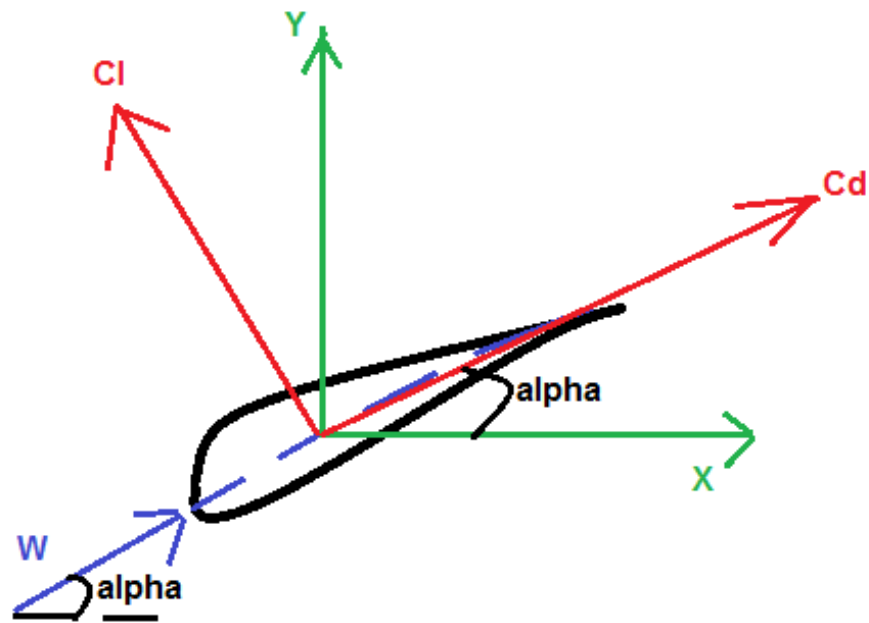
La pression dynamique est:

$$P_{\text{dynamique}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W^2$$

De cette manière on peut définir les efforts en la direction x et y, à partir des valeurs des coefficients de portance et de traînée, en utilisant la figure suivante:

$$dF_x = -P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (-C_L \sin \alpha + C_D \cos \alpha) \cdot dr$$

$$dF_y = -P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha) \cdot dr$$



Les efforts volumétriques sont:

$$f_x = \frac{dF_x}{dV} = \frac{-P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (-C_L \sin \alpha + C_D \cos \alpha) \cdot dr}{\pi \cdot R^2 \cdot dr}$$

$$f_x = \frac{-P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (-C_L \sin \alpha + C_D \cos \alpha)}{\pi \cdot R^2}$$

$$f_y = \frac{dF_y}{dV} = \frac{-P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha) \cdot dr}{\pi \cdot R^2 \cdot dr}$$

$$f_y = \frac{-P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha)}{\pi \cdot R^2}$$

On présente ci-dessous le programme réalisé:

```

/*****
/* UDF for specifying an x-momentum and y-momentum source term in a
spatially */
/* dependent porous media */
*****/
#include "udf.h"

#define pi 3.1415926535
/*vitesse de rotation*/
#define w 60.0

/* airfoil chord */
#define chord 0.1

/* airfoil lift and drag*/
#define cl 0.5
#define cd 0.025

/* circle center coordinates*/
#define x0 0.0
#define y0 0.0

/* circle radius */
#define radius 0.125

/* longueur ligne */
#define longueur 1.0

/*velocity Vinfini*/
#define v 10.0

DEFINE_SOURCE(ymom,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real distance, pdyn, volume, angle, source, W,vitesse,alpha;

    C_CENTROID(x,c,t);

    if (x[2]<=longueur)
    {
        distance = pow(pow((x[0]-x0),2)+pow((x[1]-y0),2),0.5);
        source=0.0;
        //printf("avant distance = %f \n",distance);
    }

    if(distance <= radius)
    {
        /*vitesse peripherique*/
        vitesse=w*longueur;
        /*upstream velocity*/
        W=pow(pow(v,2)+pow(vitesse,2),0.5);
        volume = pi*radius*radius;
        pdyn = 0.5*C_R(c,t)*W*W;
        /*angle d'incidence*/
        alpha=acos((vitesse/W));
        angle=alpha;
    }
}

```



```

        source=-pdyn*chord*(-cl*sin(angle)+cd*cos(angle))/volume;
/* printf("distance = %f \n",distance);*/
    }
    return source;
}

DEFINE_SOURCE(xmom,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real distance, pdyn, volume, angle, source,W,vitesse,alpha;

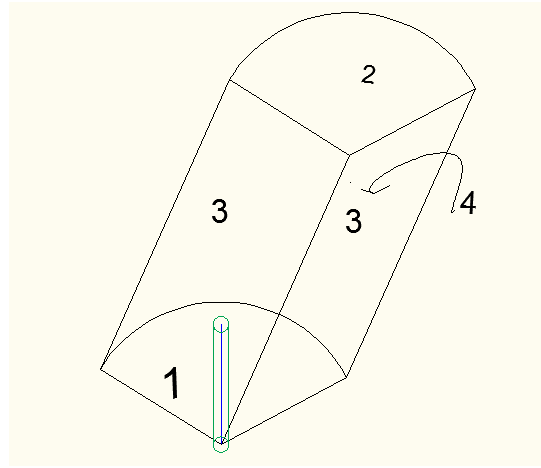
    C_CENTROID(x,c,t);

    if (x[2]<=longueur)
    {
        distance = pow(pow((x[0]-x0),2)+pow((x[1]-y0),2),0.5);
        source=0.0;
// printf("avant distance = %f \n",distance);
    }
    if(distance <= radius)
    {
        /*vitesse peripherique*/
        vitesse=w*longueur;
        /*upstream velocity*/
        W=pow(pow(v,2)+pow(vitesse,2),0.5);
        volume = pi*radius*radius;
        pdyn = 0.5*C_R(c,t)*W*W;
        /*angle d'incidence*/
        alpha=acos((vitesse/W));
        angle = alpha;
        source=-pdyn*chord*(+cl*cos(angle)+cd*sin(angle))/volume;
/* printf("distance = %f \n",distance);*/
    }
    return source;
}

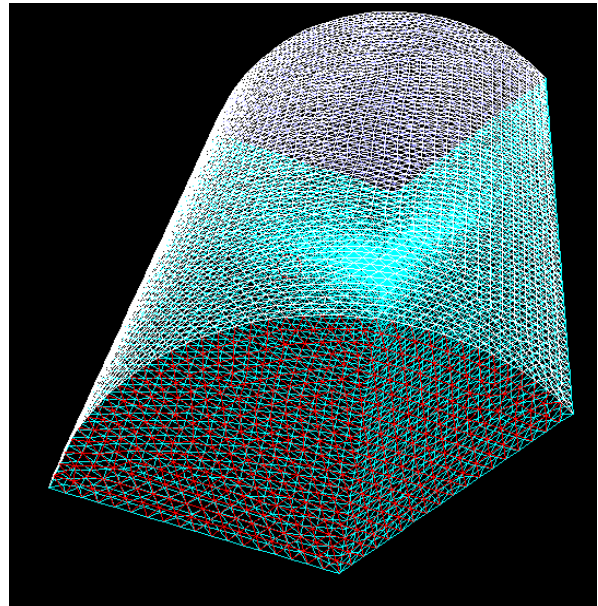
```

J'ai défini le suivant volume de control sur le logiciel Gambit, avec les suivantes surfaces:

1. Entrée
2. Sortie
3. Périodicité
4. Paroi



A l'aide du code développé en C++, j'ai calculé les valeurs des efforts volumiques à utiliser sur FLUENT dans un secteur cylindrique de 120°. Son maillage, réalisé avec le logiciel GAMBIT, est représenté dans le graphique ci-joint.



Ce travail servira de base pour la réalisation des futures simulations au sein du laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ENSAM.

## 7. Conclusion finale

L'objectif principal de ce travail était le développement d'un modèle hybride du rotor éolien, qui pourrait être utilisé pour l'étude des parcs éoliens, en améliorant le temps de calcul.

Deux cas ont été analysés et comparés:

- Modélisation de la géométrie réelle des pales de rotor.
- Modélisation d'une géométrie simplifiée avec l'utilisation des modèles hybrides.

Dans le premier cas, cette modélisation est valable pour l'analyse aérodynamique des rotors éoliens, mais, non pour l'étude globale d'un parc éolien comportant plusieurs éoliennes. La taille du domaine de simulation sera excessive et la puissance des moyens de calcul existants actuellement ne permet pas d'obtenir la solution dans un temps raisonnable.

La deuxième modélisation permet, par contre, un meilleur compromis entre la précision et le temps de calcul lors de l'étude des parcs éoliens.

Finalement, l'utilisation des codes en C++ qui peuvent être compilés sur FLUENT, nous aideront à la réalisation des simulations simplifiées permettant de comprendre comment est le comportement de l'écoulement autour de la ligne active qui représente la pale du rotor.

Toutes les expérimentations réalisées seront de grande utilité dans l'amélioration des conditions d'extraction d'énergie du vent, et donc dans l'amélioration des performances des parcs éoliens.

## 8. Annexes

```

/* ===== */
/*UDF for specifying pressure discontinuity profile on airfoil chord */
/* ===== */
#include "udf.h"
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "math.h"
#define MAXCHAR 200
static double x_e[300], pres_e[300];
static int enodes=0;
void aitken (double x[], double f[], int n, double z, double y[], double dy[]);
int aitken_1(double x[], double f[], int n, double z, double y[], double dy[]);
FILE *stream_pressure;

DEFINE_PROFILE(pressure_profile,tudf,iudf)
{
    real xudf[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real yudf;
    face_t fudf;

    int icount;
    float x1,x2;
    int numclosed,i;
    char buffer[MAXCHAR];
    char *pEnd;

    double lenght,step;
    double z,y_e[300],dy_e[300];

    if (enodes==0)
    {
        Message("the file must be read for the first time");
        /* Open for read (will fail if file "delta_p.txt" does not exist) */
        stream_pressure=fopen("delta_p.txt", "r" );

        if(stream_pressure==NULL)
        {
            Message("Error: can't open file 'delta_p.txt'.\n");
            return 1;
        }

        /* reading the file containing extrados pressure */
        icount=0;

        while(!feof(stream_pressure))
        {
            fscanf( stream_pressure, "%f %f \n",&x1,&x2) ;

```

```

/*      Message("x=%f , p=%f, i=%i, ",x1,x2,icount);*/
      x_e[icount]=x1;pres_e[icount]=x2;
/*      Message(" x_e=%f , p_e=%f, i=%i \n",x_e[icount],pres_e[icount],icount);*/
      icount=icount+1;
      enodes=icount;
    }

/*      Message("number of elements =%i \n",icount); */
} else {Message("the files is already read");}

      begin_f_loop(fudf,tudf)
      {
          F_CENTROID(xudf,fudf,tudf);
          z = xudf[0];
/*      Message("%f %f %i\n",z,step,i); */
          aitken_1(x_e, pres_e, enodes, z, y_e, dy_e);
          F_PROFILE(fudf,tudf,iudf) = y_e[0];
/*      Message("%f z= %f dp= %f \n",z,y_e[0]); */

      }
      end_f_loop(fudf,tudf)

/*
=====
*/
/* All files are closed: */
numclosed = _fcloseall( );
/* printf( "Number of files closed by _fcloseall: %u\n", numclosed );*/
return;
}

/* interpolating subroutines */
int aitken_1(double xi[], double fi[], int n, double x, double f[], double df[])

/* xi array with abscisae*/
/* fi array with values*/
/* n number of nodes */
/* !!!!ATTENTION max index of array element is n-1*/
/* x point of interpolation */
/* f interpolated value */
/* df precision epsilon */
{
#define MAXPOINT 11 /*number of node of interpolation*/
double xint[MAXPOINT],fint[MAXPOINT];
int i,ier,ipos,istart,ni=MAXPOINT;
if((x<xi[0]) || (x>xi[n-1])) /*checking intepolation interval*/
{
/*      printf("\n out of interpolation interval \n");*/
/*      printf(" xi[0]= %f, x=%f, xi[n]=%f\n", xi[0],x,xi[n-1]);*/

```

```

        return(1);
    }

    ipos=-1;
    i=0;
    for(i=0;i<n-1;i++)
    {
        if((xi[i]<=x)&&(x<=xi[i+1]))
        {
            ipos=i;
            ier=0;
        }
    }

    istart=ipos-(MAXPOINT-1)/2;
    if(ipos<=(MAXPOINT-1)/2)
    {istart=0;}
    if(ipos>=(n-(MAXPOINT-1)/2))
    {istart=n-MAXPOINT;}
    /*      printf("\n debut  ipos=%i, for x=%f \n",ipos,x); */
    for(i=0;i<MAXPOINT;i++)
    {
        xint[i]=xi[istart+i];
        fint[i]=fi[istart+i];
    /*      printf("x= %f , f= %f \n",xint[i],fint[i]); */
    }
    aitken(xint, fint, ni, x, f, df);
    /*      printf("\n from aitken_1   x= %f , f interp= %f, f calcul= %f\n",x ,&f,exp(x)); */

    return(0);
}

```

```

void aitken(double xi[], double fi[], int n, double x, double f[], double df[])
/* Subroutine for the interpolation with the Aitken method.
Copyright (c) Tao Pang 1997. */

```

```

#define NMAX 11 /* The number of rows in the interpolation/extrapolation table. */

```

```

{
    int i, j;
    double x1, x2, f1, f2;
    double ft[NMAX];

    for (i = 0; i <= (n-1); ++i)
    {
        ft[i] = fi[i];
    }
    for (i = 0; i <= (n-2); ++i)

```

```
{
  for (j = 0; j <= (n-i-2); ++j)
  {
    x1 = xi[j];
    x2 = xi[j+i+1];
    f1 = ft[j];
    f2 = ft[j+1];
    ft[j] = (x-x1)/(x2-x1)*f2+(x-x2)/(x1-x2)*f1;
  }
}
f[0] = ft[0];
df[0] = (fabs(f[0]-f1)+fabs(f[0]-f2))/2.0;
}
```

## 9. Références bibliographiques

- [1] "Wind energy and EU climate policy". European Wind Energy Association (EWEA). October 2011.
- [2] "CFD Calculations of S809 Aerodynamic Characteristics". Engineering Sciences Center. Walter P. Wolfe.
- [3] "Wind in power". 2011 European statistics by the European Wind Energy Association (EWEA).
- [4] *"Développement d'un modèle de surface active pour améliorer la représentation des charges aérodynamiques sur une pale éolienne"*. Thèse de doctorat, ENSAM ; MEMON, Asif. 2012.
- [5] *"Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien"*. Thèse de doctorat, ENSAM; JOURIE, M. 2007.
- [6] « NACA 0015 Wing Pressure and Trailing Vortex Measurements ». McAllister & Takahashi, 1991
- [7] *"Lift, Drag and Moment of a NACA 0015 Airfoil"*. MILLER, Steven. 2008.
- [8] *"Wind turbine wake aerodynamics"*. VERMEER, L ; SORENSEN, J. 2003.
- [9] *"Wind energy handbook"*. BURTON, Tony; SHARPE, David; JENKINS, Nick; BOSSANYI, Ervin. 2001.
- [10] *"Modèle hybride de surface active pour l'analyse du comportement aérodynamique des rotors éoliens à pales rigides ou déformables"*. Thèse de doctorat, ENSAM. DOBREV, Ivan. 2009.





# « Utilisation d'un modèle hybride afin d'accélérer la simulation numérique d'une éolienne »

Projet : PA-F12093



Elève: Daniel Carciente de Blas  
Tuteur: M. Fawaz Massouh et M. Ivan DOBREV  
26 Juin 2012  
Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers  
Paris-FRANCE

# ***Approche au Projet***

- Développement d'un modèle équivalent du rotor éolien réel.
- Simulation numérique sans représenter la géométrie réelle des pales.
- Réduction significative du temps de calcul afin de pouvoir simuler plusieurs éoliennes. Optimisation du parc éolien.
- Analyse et comparaison des résultats obtenus.
- Mots clés: Sillage éolien, simulation et modèle hybride.

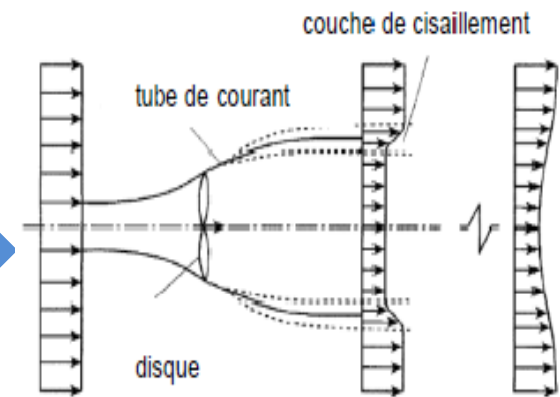
# ***Introduction***

- Energie éolienne:
  - Energie renouvelable.
  - Moyen industriel de production d'électricité.
  - Forte croissance depuis le début des années 1990.
  - Avantages:
    - ☐ Le vent es une ressource inépuisable.
    - ☐ Rôle important contre le changement climatique.
    - ☐ Coût de l'énergie compétitif.
  - Inconvénients:
    - ☐ L'intermittence et l'imprévisibilité de la production éolienne.

# Introduction théorique

- Facteurs qui influencent le fonctionnement d'un parc éolien:  
Topographie du terrain, les conditions atmosphériques et l'interaction entre les éoliennes.

- Sillage éolien



- Modèle hybride

Modèle équivalent du rotor réel éolien pour diminuer le temps de calcul

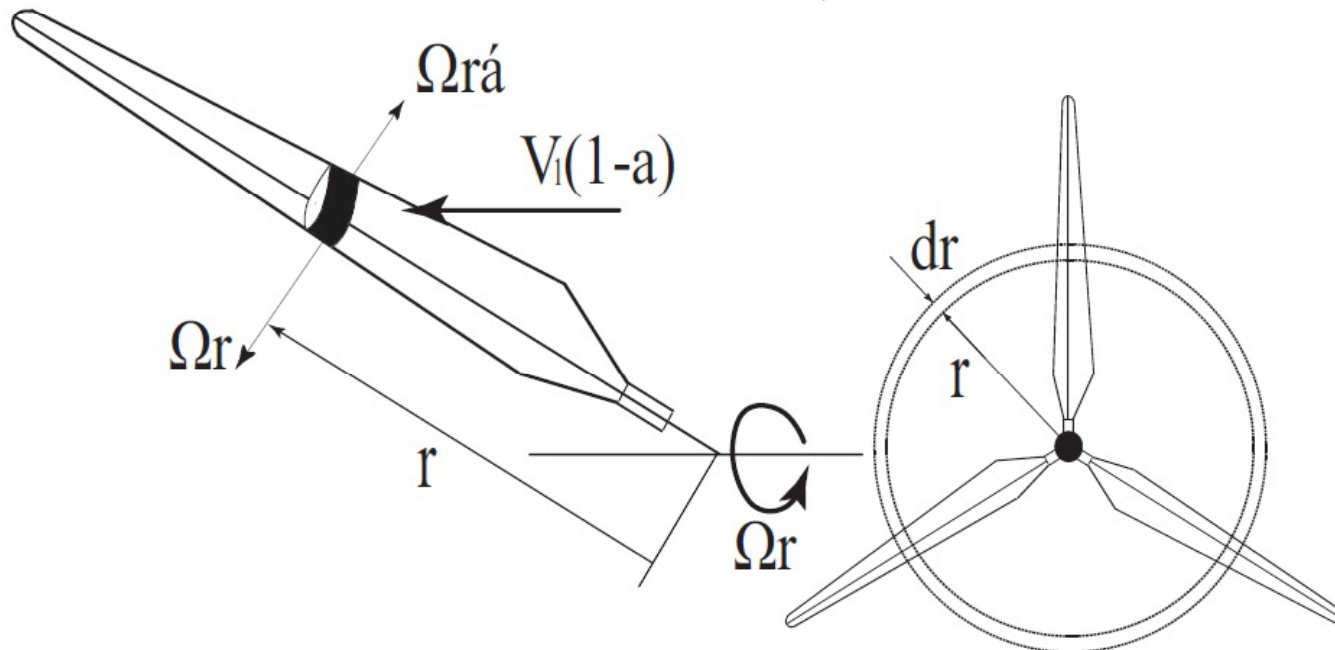
- Coefficient de puissance et Limite de Betz

$$C_p = \frac{\text{Puissance extraite}}{\text{Puissance disponible}}$$

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0,593$$

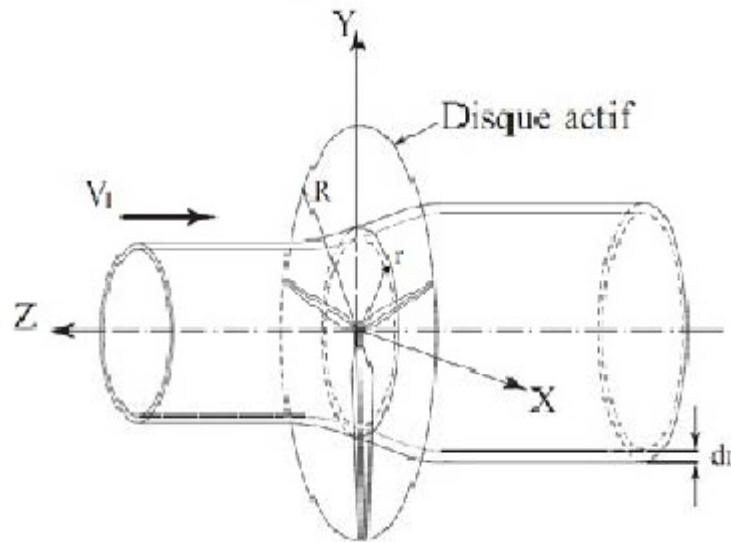
# Théorie de l'élément de pale (BEM):

- Division de l'écoulement en volumes de contrôles annulaires de l'infini amont à l'infini aval.
- Application des équations de quantité de mouvement et d'énergie.



# Types de modèles hybrides

- Disque actif:



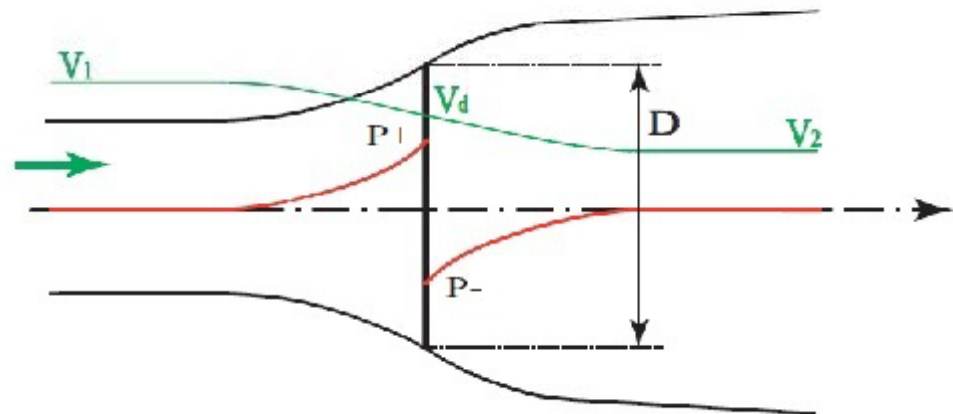
## AVANTAGES:

- Eoliennes axisymétriques
- Sillage éolien lointain

## LIMITATIONS:

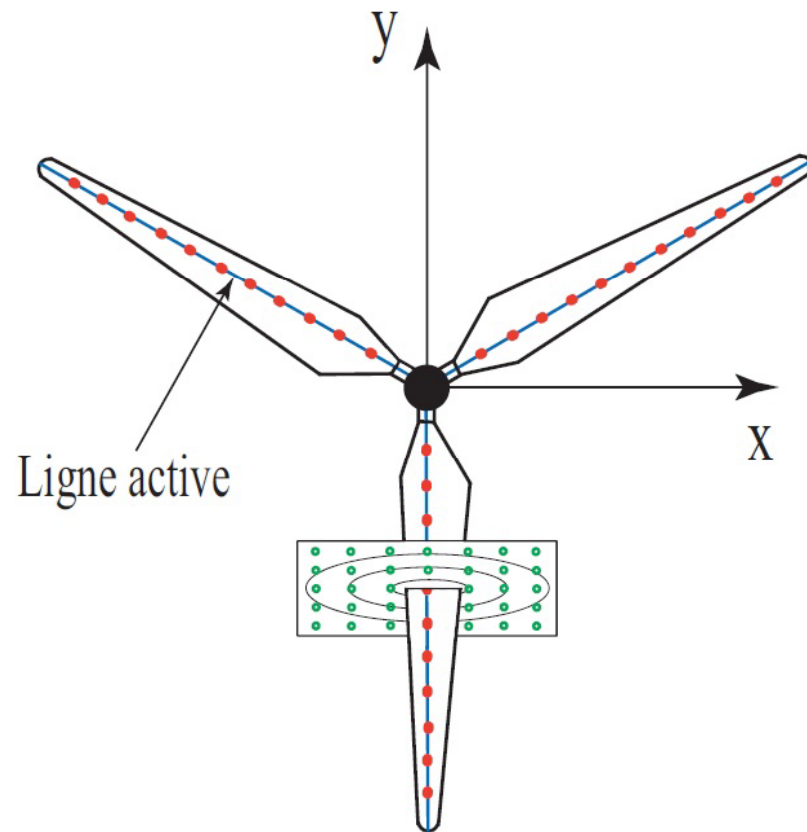
- Représentation de chaque pale individuel
- Distribution des efforts aérodynamiques sur toute la surface balayée

- Le plus simple
- Remplacement du rotor par un disque
- Surface de discontinuité de pression



# Types de modèles hybrides

- Méthode de la ligne active:



Il a été créé pour éliminer les limitations du disque actif.

Elle prend en compte le nombre des pales. Représentation individuelle.

Discretisation de la ligne en N points.

Concept de cylindre actif.

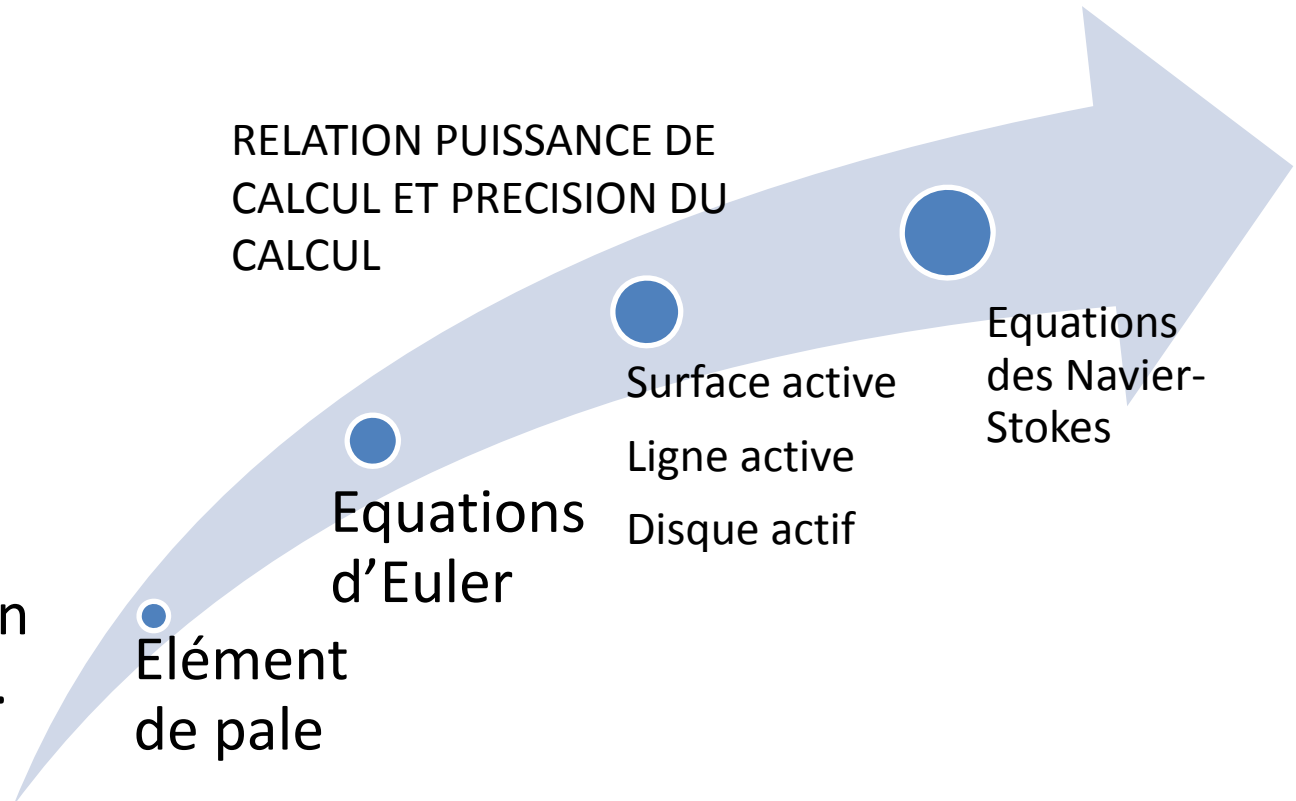


# Types de modèles hybrides

- Méthode de la surface active:
  - ☐ Modèle plus proche de la réalité.
  - ☐ La pale est remplacé par une surface de discontinuité de pression.
  - ☐ Elle représente bien le sillage proche de l'éolien.

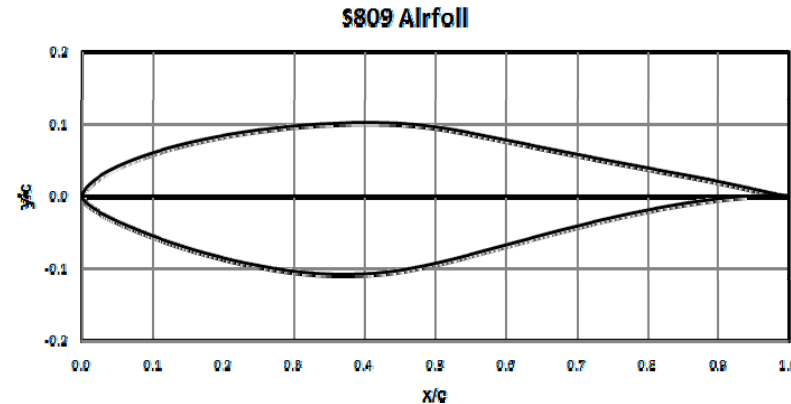
# Validation des modèles?

- Comparaison des résultats expérimentaux et à partir de simulation.
- Analyse précise du sillage éolien.
- Analyse de la puissance en fonction de la vitesse du vent.
- Réduction du temps de calcul.



# L'apprentissage de Fluent

- Profil aérodynamique s809 (épaisseur maximale de 21%)
- $V_{\infty} = 10 \text{ m/s}$
- Nombre de Reynolds:  $6,85 \cdot 10^5$
- Angles d'incidence:  $\alpha = 0^\circ$ ;  $5.13^\circ$ ;  $10.2^\circ$ ;  $15.23^\circ$ ;  $20.16^\circ$ ;  $30.2^\circ$ ;  $40^\circ$ ;  $50^\circ$ ,  $70^\circ$  et  $90^\circ$ .
- Modèle de turbulence: k-w SST



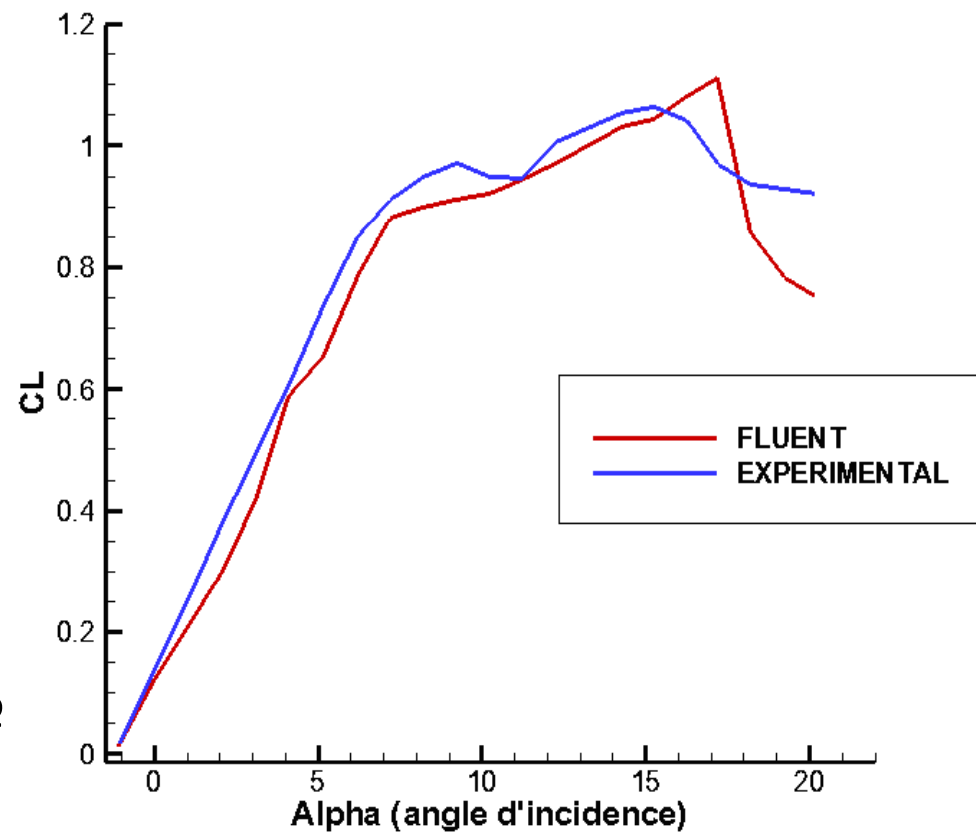
# PROFIL s809

- Coefficient de portance et traînée

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot V_\infty^2 \cdot c}$$

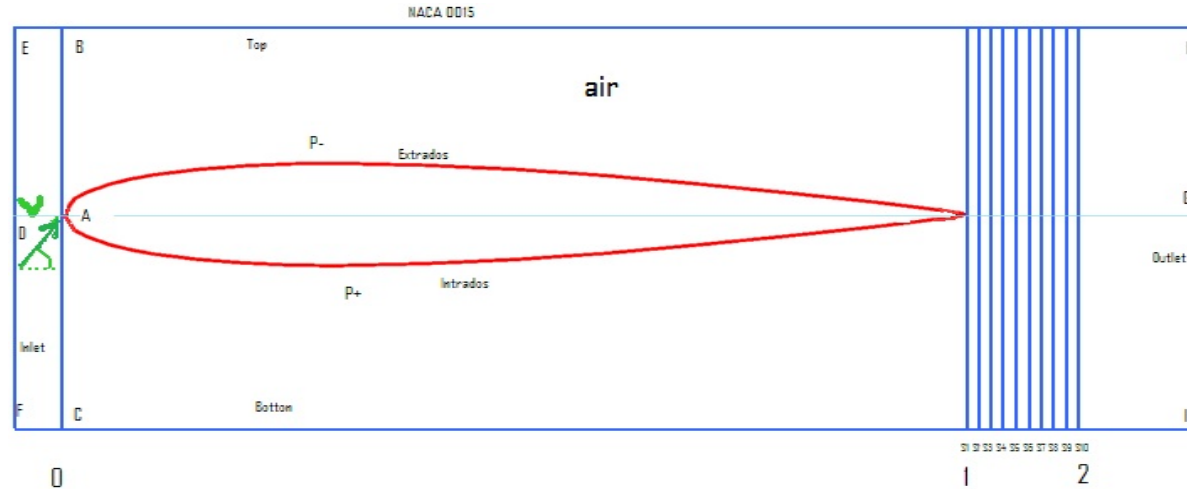
$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot V_\infty^2 \cdot c}$$

Angle de décrochage: 17°



# Simulation du profil NACA 0015

Profil NACA 0015 (profil symétrique). Corde du profil  $c=1\text{m}$



Détermination de: limites de VF, conditions aux limites

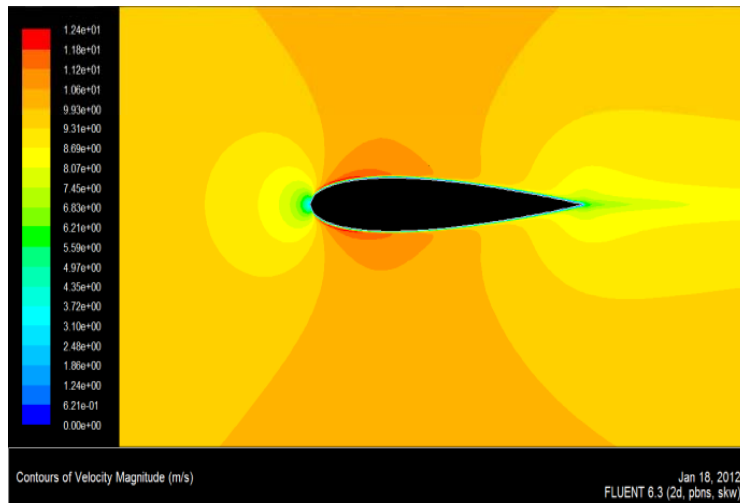
Maillage structuré: Quad-Map

$V_{\infty}=10\text{m/s}$ .

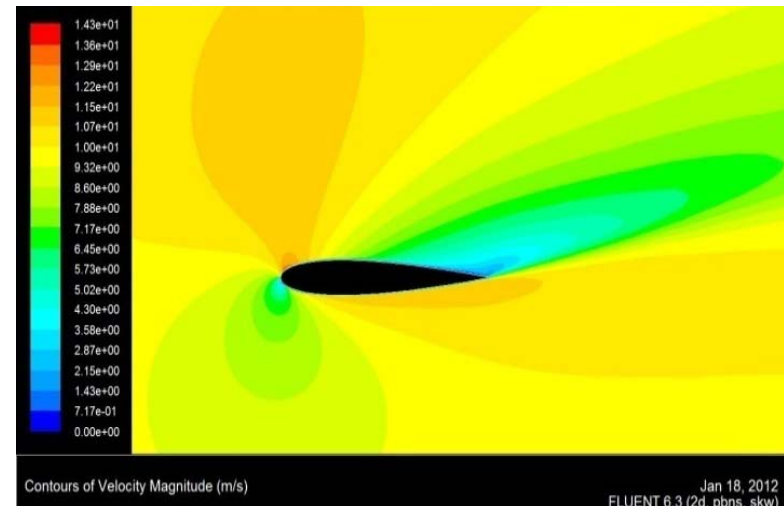
Modèle de turbulence:  $k-\omega$  SST

Dix angles d'incidence:  $\alpha=0^{\circ}$ ;  $5.13^{\circ}$ ;  $10.2^{\circ}$ ;  $15.23^{\circ}$ ;  $20.16^{\circ}$ ;  $30.2^{\circ}$ ;  $40^{\circ}$ ;  $50^{\circ}$ ,  $70^{\circ}$  et  $90^{\circ}$ .

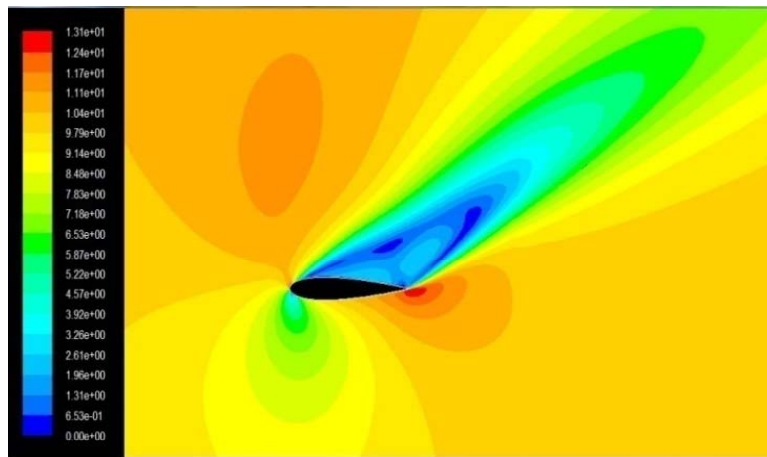
# Simulation du profil NACA 0015



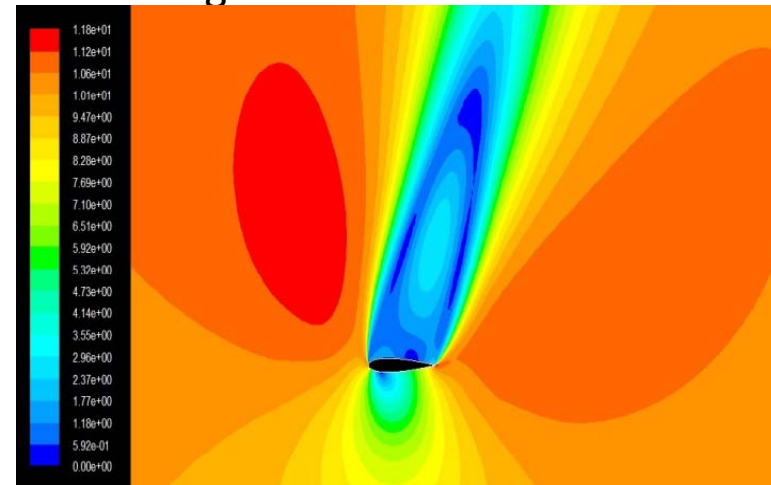
angle d'incidence nul



angle d'incidence 15.23°



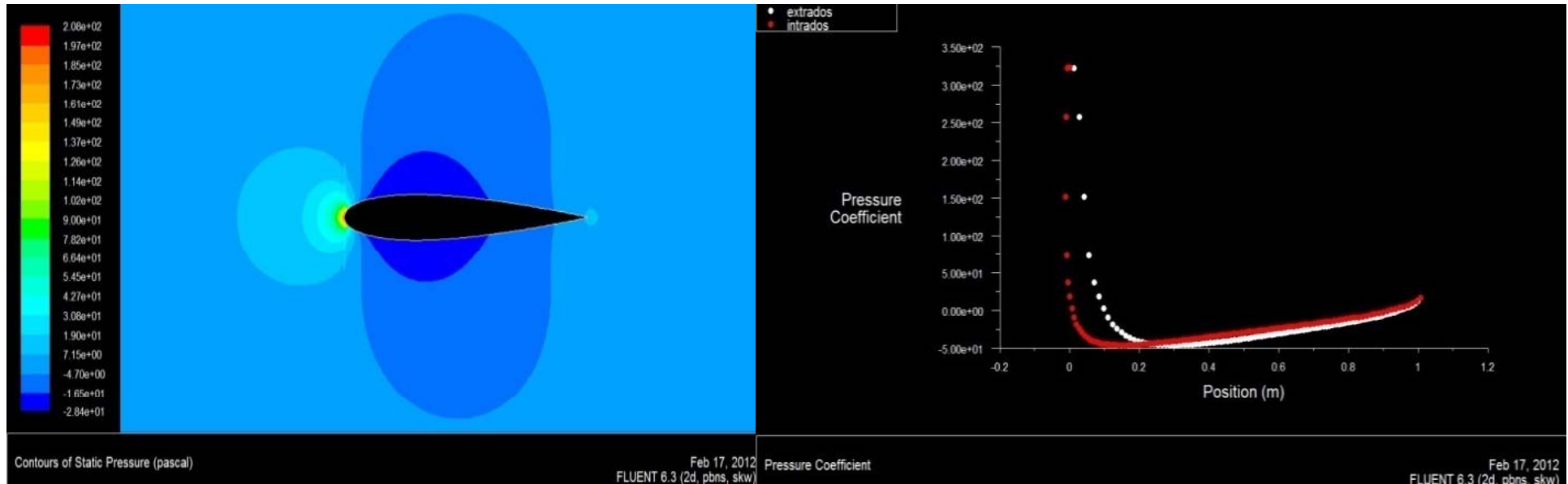
angle d'incidence 30.2°



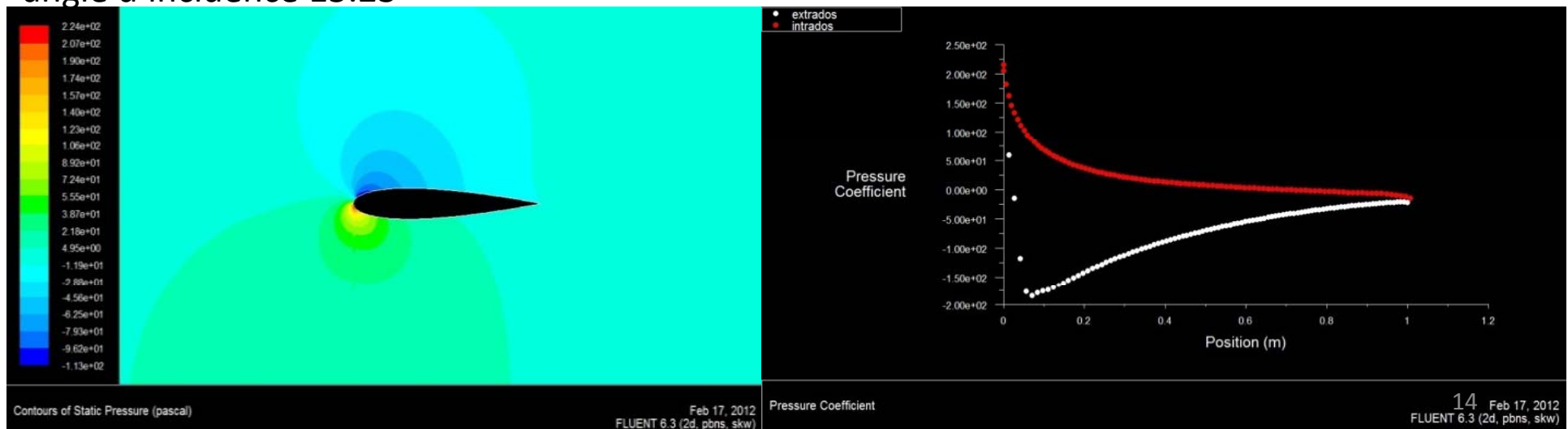
angle d'incidence 70°

# Simulation du profil NACA 0015

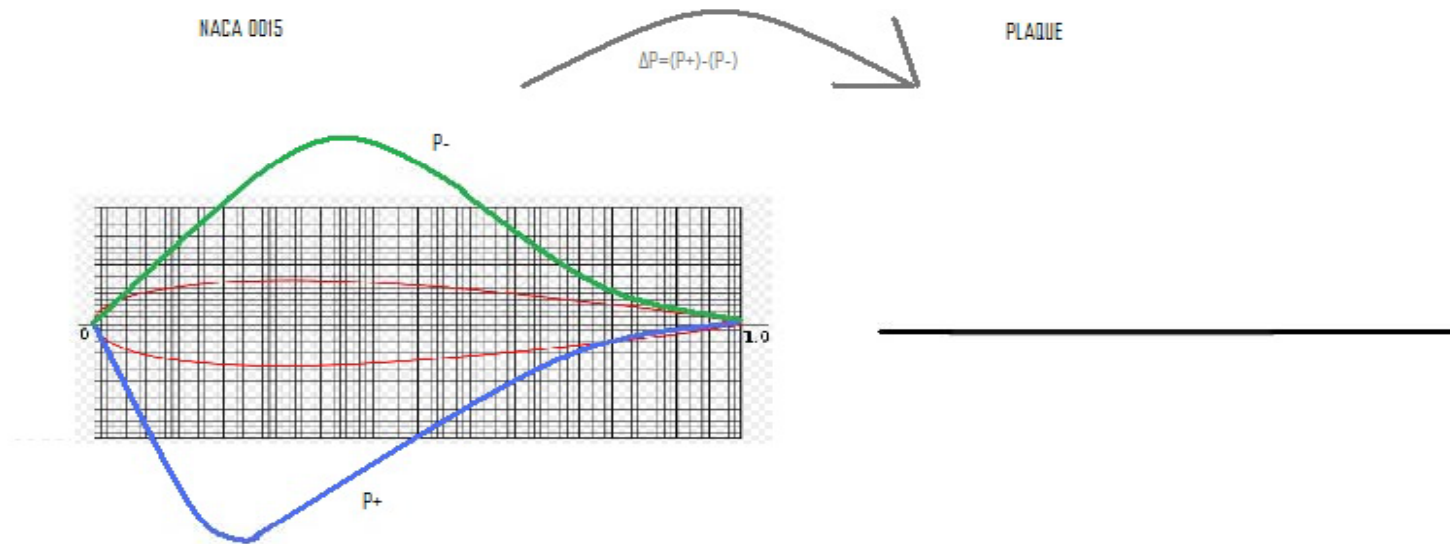
angle d'incidence nul



angle d'incidence  $15.23^\circ$



# Validation du modèle de plaque



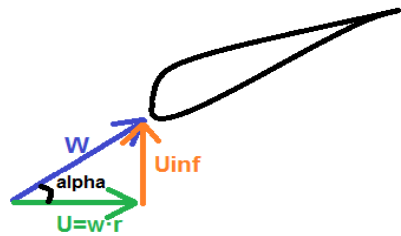
- Exportation des valeurs de  $\Delta P$  obtenues dans l'expérimentation du profil NACA 0015 à une plaque par les différents angles d'incidence choisis.
- Utilisation d'un code fait en programmation C++.
- Comparaison de champ de vitesse profil et plaque.
- Validation de l'approximation.



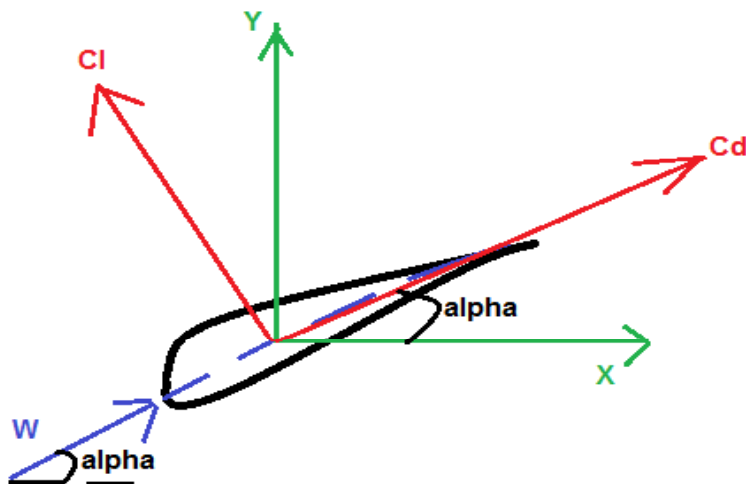
# Programmation en C++

- Réalisation d'un code que détermine la distance entre un point en 3D et la ligne active qui représente la pale éolien.

$$W = \sqrt{U^2 + U_{\infty}^2} = \sqrt{(\omega \cdot r)^2 + U_{\infty}^2}$$



$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\omega \cdot r}{W}$$



$$dF_x = -P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (-C_L \sin \alpha + C_D \cos \alpha) \cdot dr$$

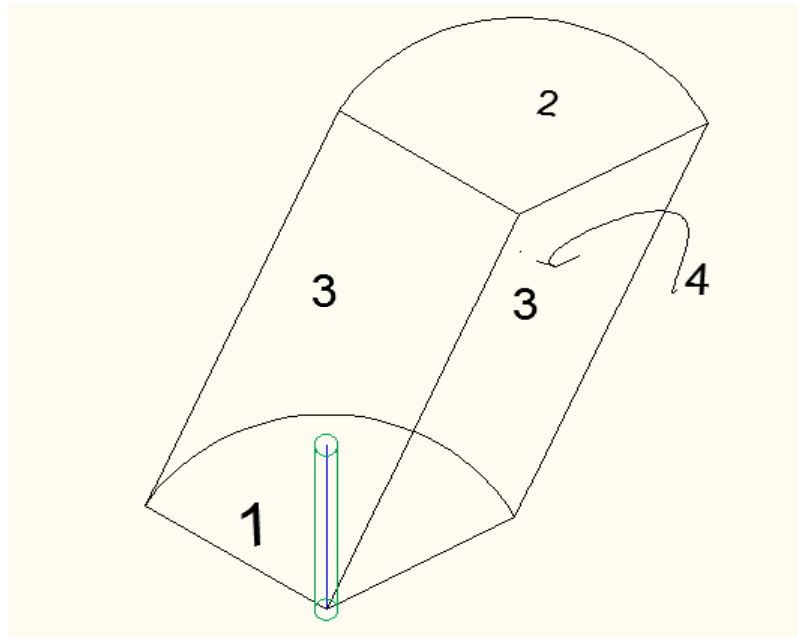
$$dF_y = -P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha) \cdot dr$$

$$f_x = \frac{-P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (-C_L \sin \alpha + C_D \cos \alpha)}{\pi \cdot R^2}$$

$$f_y = \frac{-P_{\text{dynamique}} \cdot c \cdot (C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha)}{\pi \cdot R^2}$$

Si la distance est inférieure à une valeur donnée, on fera les calculs nécessaires sur la ligne active

# Programmation en C++



volume de control:

1. Entrée
2. Sortie
3. Périodicité
4. Paroi

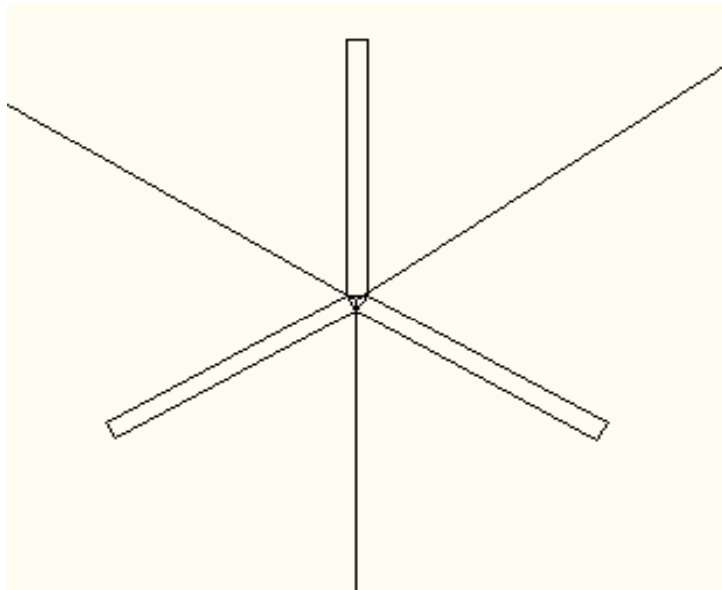
On fera tourner la pale avec une vitesse de rotation  $\omega$  autour de l'axe Z de rotation.

Calcul stationnaire.

On utilisera le code réalisé sur FLUENT pour calculer les efforts volumiques seulement dans les points proches à la pale (à partir de la méthode de la ligne active)

# Expérimentation

Le but est la simulation d'une éolienne tripale, mais en considérant seulement une pale.



Utilisation de  
la méthode  
de la ligne  
active

# Conclusion finale

Développer un modèle hybride du rotor éolien.

Comparer les résultats: géométrie réelle et simplifié pour valider le modèle.

Performance des parc éoliens.

Amélioration des conditions d'extraction d' énergie.

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**